

Schlussbericht vom 27.09.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20410 N

Thema

Bereitstellung von experimentell abgesicherten CFD-Modellen für die thermische Umsetzung von Ersatzbrennstoffen (FLUFF)

Berichtszeitraum

01.02.2019 bis 31.01.2022

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. - DVV

Forschungseinrichtung(en)

Nr. 1: Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT)

Nr. 2: Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Institut für Technische Chemie (ITC)

Nr. 3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en)	1
Kurzfassung	4
1. Einleitung	5
1.1 Ziel	5
1.2 Methodik	6
2. Durchgeführte Arbeiten, erzielte Ergebnisse	7
2.1 Übersicht zu den Projektergebnissen	7
2.2 AP1: Brennstoffbeschaffung und Grundcharakterisierung (FS1, 2 PM, FS2, 2 PM)	10
2.3 AP2: Ermittlung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte an nicht-reagierenden Partikeln in einem Fallschacht (FS1, 6 PM)	17
2.4 AP3: Abbrandversuche an einem Einzelpartikelreaktor (FS1, 4 PM)	32
2.5 AP4: Erweiterung und Überprüfung der Flug- und Abbrandmodelle (FS1, 3 PM)	42
2.6 AP5: Modifikation und Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage BRENDA (FS2, 4,5 PM)	45
2.7 AP 6: Entwicklung eines optischen Messsystems zur Analyse des Flug- und Zündverhaltens reagierender Partikel (FS3, 6 PM)	47
2.8 AP7: Versuche in einem „heißen“ Fallschacht an reagierenden Partikeln im Flugstrom (FS2, 7 PM, FS1, 2 PM, FS3, 7 PM)	65
2.9 AP8: Simulation der heißen Fallschachtversuche und Modellabgleich (FS1, 3 PM)	71
2.10 AP9: Verbrennungsversuche in einem halbtechnischen Drehrohr (FS2, 7 PM, FS3, 6,5 PM)	71
2.11 AP10: Simulation der Drehrohrversuche und Modellabgleich, Anwendung auf ein industrielles Zementdrehrohr (FS1, 7 MM)	86
2.11 AP11: Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens, Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie der EBS-Datenbank (FS1, 3 PM, FS2, 2 PM, FS3, 3 PM)	95
3. Zusammenfassung und Ausblick	106
4. Verwendung der Zuwendung	107
5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	110
6. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	111

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	112
8. Umsetzung des Transferkonzeptes	115
9. Gewerbliche Schutzrechte.....	116
10. Förderhinweis	117
Literatur	118

Kurzfassung

Ersatzbrennstoffe (EBS) in Form von FLUFF (flugfähige Fraktion) werden überwiegend in der Zementindustrie zur Substitution fossiler Energieträger eingesetzt. Die im FLUFF enthaltenen grobstückigen Brennstoffpartikel zeigen ein von Regelbrennstoffen (Kohlenstaub) abweichendes Abbrandverhalten. Dies kann zu Problemen im Betrieb der Zementdrehrohröfen und zu einer Minderung der Zementqualität führen. Versuche zum Ersatz von Regelbrennstoffen sind im Originalmaßstab oft zu aufwendig. Hier bieten numerische 3D-Simulationen (CFD-Simulationen) eine effiziente Alternative. In kommerziellen Codes sind jedoch keine Modelle enthalten, welche die Beschreibung des Flugverhaltens und des Abbrands von FLUFF adäquat zulassen. Hier setzte dieses Forschungsvorhaben an.

Durch eine Kombination aus erweiterter Brennstoffcharakterisierung und Modellbildung mit anschließender Überprüfung der Simulationsergebnisse anhand eines halbtechnischen Drehrohrs wurde die CFD-Berechnung der FLUFF-Verbrennung überprüft. Die erweiterte Brennstoffcharakterisierung kombinierte dabei Laboruntersuchungen (Elementar- und Immediatanalyse sowie Kalorimetrie) mit Versuchen an einem Fallschachtsystem (Bestimmung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte) und an zwei Einzelpartikelreaktoren (Untersuchung des Abbrand-/Schmelzverhaltens). Darüber hinaus wurden stoffliche „Fingerprints“ durch einen eigens für dieses Projekt beschafften Röntgenfluoreszenzanalysator aufgenommen. Die dabei abgeleiteten Informationen dienten dazu, das Abbrandverhalten von Ersatzbrennstoffen besser zu verstehen, speziell von in Ersatzbrennstoffen enthaltenen Kunststoffen. Methoden der erweiterten Brennstoffcharakterisierung wurden nicht nur für Ersatzbrennstoffe, sondern ebenso für wohl definierte Modellpartikel als Referenzbrennstoffe durchgeführt. Die daraus gewonnenen Daten wurden für die CFD-Simulationen genutzt. Dabei wurde das Drehrohr der halbtechnischen Anlage BRENDA (Brennkammer- mit Dampfkessel) des KIT nachgebildet und simuliert. Die Anlage umfasst das Drehrohr, die Nachbrennkammer sowie eine Rauchgasreinigung. Für dieses Projekt waren das Drehrohr sowie die Nachbrennkammer von Relevanz. Speziell für den Eintrag des FLUFFs in die Feuerungen wurden sowohl für das Drehrohr als auch für die Nachbrennkammer spezielle Lanzen konstruiert und angefertigt. Innerhalb der Versuchskampagnen am Drehrohr wurden Prozessparameter wie der Förderluftdruck und die Brennstoffaufgabe variiert und entsprechend als Randbedingungen für die CFD-Simulationen verwendet. Zusätzlich hat während der Experimente ein kontinuierliches Monitoring der Prozessparameter (Temperatur, Gasvolumenstrom, Spezieskonzentration) stattgefunden. Durch ein optisches Messsystem (Lichtfeldkamera) wurden dabei die Flugbahnen der aufgegebenen Partikel untersucht. Durch eine neu entwickelte Auswertemethodik, bestehend aus Partikeldetektion und -tracking wurden Trajektorien für einzelne Partikel sowie Geschwindigkeit und Flugdauer bestimmt. Die Detektion dient dazu, ungezündete und gezündete FLUFF-Partikel durch eine Kombination zwei- und dreidimensional arbeitender Algorithmen zu erfassen. Diese Ergebnisse wurden schließlich zur Überprüfung der Simulationsmodelle herangezogen.

Die in den Simulationen berechneten Flugbahnen lassen sich auch in Realität (BRENDA) beobachten. Die durch Simulation bestimmten Verweilzeiten und Geschwindigkeiten weichen von den mittels Lichtfeldkamera ermittelten Geschwindigkeiten kaum ab. Insgesamt besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen den Simulationen und der Realität.

1. Einleitung

Abfälle sind eine bedeutende Rohstoffquelle für die Transformation hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem (Kreislaufwirtschaft). Wenn jedoch verschiedene Materialien im Abfall so stark vermischt sind, dass die Möglichkeiten moderner Wiederaufbereitungsverfahren an ihre Grenzen stoßen, ist ein stoffliches Recycling unmöglich. In dem Fall ist die thermische Verwertung dieser Abfälle als sogenannte *Ersatzbrennstoffe* (EBS) zur Energiebereitstellung eine Alternative.

Der Großteil der Ersatzbrennstoffe wird in der Zementindustrie zur Substitution fossiler Energieträger eingesetzt, um Brennstoffkosten zu sparen und die CO₂-Bilanzen der Anlagen zu verbessern, denn durch die im EBS enthaltenen biogenen Fraktionen geschieht die Verbrennung teilweise CO₂ neutral [1]. Vor allem die flugfähige Feinfraktion (FLUFF) ist für industrielle Feuerungen von besonderem Interesse, da sich dieser Brennstoff pneumatisch in Brennkammer einblasen lässt. Insbesondere in der Zementindustrie, mit einem hohen thermischen Energiebedarf von 3,5 GJ pro produzierter Tonne Zement und einem Anteil von 8 % an den weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen, hat der Einsatz von FLUFF erhebliches Potenzial [2]. Gerade weil die Optimierungspotenziale hinsichtlich der Energieeffizienz schon annähernd erreicht sind, nimmt der Einsatz an EBS stetig zu und beträgt in der deutschen Zementindustrie 69 % (2020) [3]. Dennoch besteht noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich des Flug- und Konversionsverhaltens von EBS. Im Flug nicht vollständig umgesetzte Brennstoffpartikel setzen sich im Klinkerbett weiter um, was negative Auswirkungen auf die Klinkerqualität haben kann. Zudem verändert der Einsatz von EBS die Flammgeometrie und somit die lokale Temperaturverteilung im Zementklinkerbrennprozess [1].

Um die genauen Auswirkungen im realen Betrieb nachzuverfolgen, sind Versuche zum Einsatz von EBS zur Substitution von Regelbrennstoffen nötig, diese jedoch im Originalmaßstab oft zu teuer und schwierig zu realisieren sind, da meist nur eine begrenzte messtechnische Erreichbarkeit der Anlagen besteht. Hier stellen 3D-Verbrennungssimulationen (CFD-Simulationen) eine preisgünstige und effiziente Alternative dar. Doch vielen KMU ist es nicht möglich, diese Art von Untersuchungen durchzuführen, weswegen dieses Forschungsvorhaben in erster Linie an die KMU der deutschen Zementindustrie adressiert ist.

1.1 Ziel

Ziel des Projektes ist es, das Abbrand- und Flugverhalten von EBS durch Simulationsmodelle realitätsnah abzubilden, um genaue Vorhersagen bezüglich des EBS-Verhaltens im Zementdrehrohröfen zu treffen. Beispielsweise ist es aufgrund der Simulationsergebnisse möglich, Empfehlungen für die Aufbereitung des EBS abzugeben (z.B. den Anteil an großen Kunststoffpartikeln reduzieren, da diese häufig unverbrannt im Klinkerbett auftreten). Hierzu ist es nötig, die bereits bestehenden Simulationsmodelle aufzubereiten und zu überprüfen, woraus sich die beiden folgenden Hauptziele des Projektes ergeben:

- Erstmalige Messung der Partikeltrajektorien unter realitätsnahen Bedingungen in einem Drehrohr (halbtechnischen Anlage BRENDA) zum Abgleich mit den Simulationsergebnissen.
- Nachweis, dass die im Rahmen des Projektes verbesserten EBS-Modelle in der Lage sind, die Vorgänge in Drehrohröfen verlässlich abzubilden.

1.2 Methodik

Forschungsstelle 1 (RUB, LEAT) beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Grundcharakterisierung des EBS, der Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens durch Versuche am Fallschachtsystem sowie den beiden Einzelpartikelreaktoren und der numerischen Simulation. Die Forschungsstelle 2 (KIT, ITC) kümmert sich um die Beschaffung des EBS und ist zuständig für die Modifikation und Durchführung der Versuche an der halbtechnischen Versuchsanlage BRENDA. Forschungsstelle 3 (KIT, IAI) ist verantwortlich für die Entwicklung eines Kamerasystems für den Heißbetrieb an der Anlage BRENDA sowie für Anfertigung eines entsprechenden Auswertesystems. Abbildung 1 fasst die Hauptaufgabenbereiche der Forschungsstellen zusammen.



- Grundcharakterisierung
- Fallschacht „kalt“
- Einzelpartikelreaktor
- Simulationen



- Modifikation Drehrohr
- Drehrohrversuche
- Fallschacht „heiß“
- Entwicklung eines optischen Mess- und Auswertesystems

Abbildung 1. Hauptaufgabenbereiche der Forschungsstellen.

2. Durchgeführte Arbeiten, erzielte Ergebnisse

Das Zusammenwirken der einzelnen Arbeitspakete und die daran beteiligten Forschungsstellen (FS) sind in Abbildung 2 wiedergegeben.

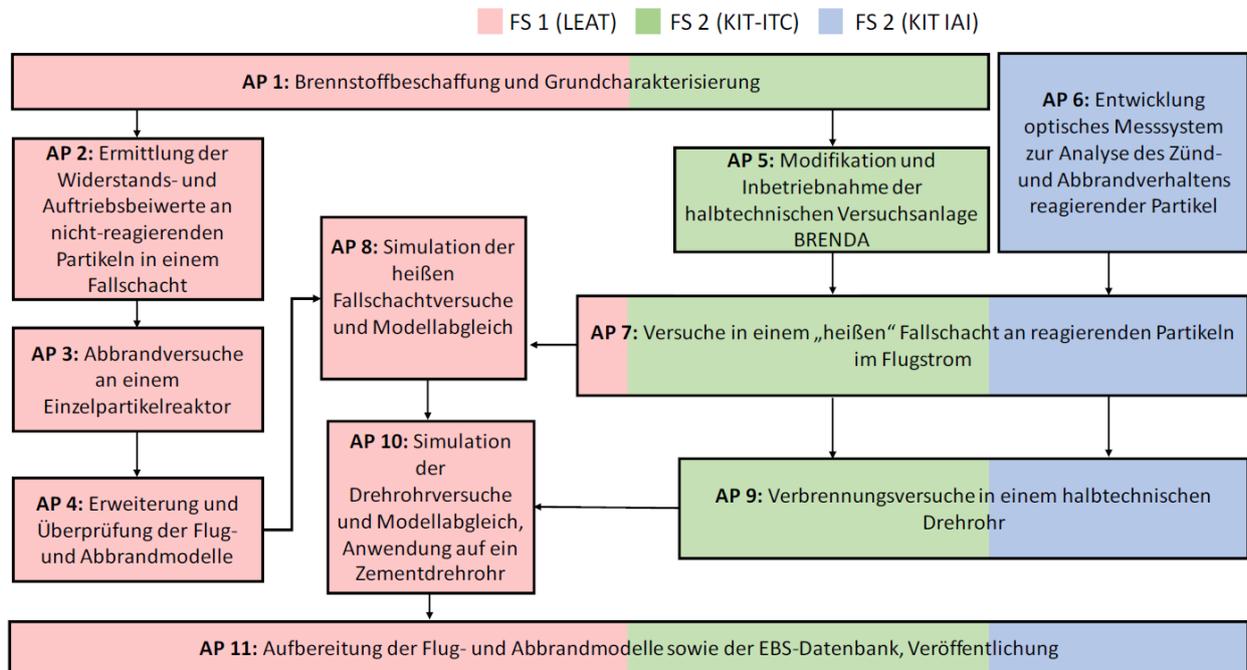


Abbildung 2. Übersicht der Arbeitspakete.

2.1 Übersicht zu den Projektergebnissen

Kapitel 2.1 dient dazu, einen Überblick über die Zielerreichung zu geben. Es wird nur kurz auf den Inhalt der einzelnen Arbeitspakete eingegangen, eine genaue Beschreibung erfolgt später.

- **In Summe wurden alle für die vorwettbewerbliche Nutzung wesentlichen Projektziele erreicht. Es steht eine in dieser Form einmalige, öffentlich zugängliche EBS-Datenbank zur Verfügung. Es liegen Widerstands- und Auftriebsbeiwerte für die komplex geformten EBS-Partikel/Fraktionen vor. Es stehen charakteristische Reaktionszeiten für EBS-Fraktionen in einem Temperaturbereich $> 1000\text{ °C}$ zur Verfügung. Erstmals wurde ein Messdatensatz in einem halbtechnischen Drehrohr generiert, der Partikeltrajektorien für reagierende EBS-Fraktionen enthält. Die mit den gewonnenen Daten abgeglichenen Flug- und Abbrandmodelle lassen die CFD-Simulation des EBS-Abbrands zu. Dies wurde anhand der Nachrechnung des Drehrohrs nachgewiesen. Damit steht für die Auslegungs- und Betriebsoptimierung von Drehrohröfen ein valides CFD-Modell zur Verfügung.**
- **Der Verbund hat erfolgreich publiziert. Es sind 8 Veröffentlichungen entstanden (zwei davon noch „under review“). Zudem werden 2022 zwei weitere Journalartikel eingereicht (Zeitschrift Fuel), zu denen der Verbund eingeladen wurde.**

AP1: Beschaffung und Grundcharakterisierung

Die Beschaffung des FLUFFs sowie die Grundcharakterisierung des Brennstoffs (Sortier-, Immediat-, Elementar- und Brennwertanalysen) wurden durchgeführt. Es wurden FLUFF-Modellbrennstoffe mit definierter Geometrie beschafft.

- **Die Zielsetzung von AP1 wurde erreicht.**

AP2: Ermittlung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte an nicht-reagierenden Partikeln in einem Fallschacht

Es sollten mit den Brennstoffen Versuche in einem Fallschachtsystem durchgeführt werden. Damit wurden in Kombination mit photogrammetrischen Untersuchungen (bei denen die Partikelgeometrie erfasst wird) Widerstands- und Auftriebsbeiwerte des Brennstoffes ermittelt, die als Eingabeparameter in die CFD-Simulationen einfließen.

- **Die Zielsetzung von AP2 wurde erreicht. Die zeitliche Auflösung der Partikeltrajektorien wurde um den Faktor 10 verbessert, so dass nun für EBS-Partikel charakteristische Taumelbewegungen zuverlässig erfasst werden. Eine neue Auswertemethode korrigiert die Unterschätzung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte, die bei der vorherigen Auswertemethode auftrat.**

AP3: Abbrandversuche an einem Einzelpartikelreaktor

Es sollten Abbrandversuche von EBS-Fractionen sowie zum Erweichungsverhalten der im FLUFF enthaltenen Kunststoffe durchgeführt werden. Speziell sollten dabei die Ursachen zur Bildung reststoff- bzw. restkoksbildender Kunststoffe untersucht werden, die aufgrund ihrer langen Umwandlungszeiten im Klinkerbett landen und dessen Qualität beeinflussen können.

- **Die Zielsetzung von AP3 wurde fast vollständig erreicht, teilweise übererfüllt. Es liegen nun charakteristische Reaktionszeiten für EBS-Fractionen bei Temperaturen > 1000 °C vor; vorgesehene Messungen > 1200° waren aufgrund von Materiallimitierungen nicht möglich. PET/PVC konnten als feststoffbildend identifiziert werden, auch ein hoher Gehalt von Ca und Ti fördert Feststoffbildung und Ca erhöht die Erweichungstemperaturen, diese Erkenntnisse gehen über das im Antrag geplante hinaus.**

AP4: Erweiterung und Überprüfung der Flug- und Abbrandmodelle

Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse wurden anschließend dazu genutzt, die bestehenden CFD-Modelle zu erweitern.

AP5: Modifikation und Inbetriebnahme einer halbtechnischen Versuchsanlage BRENDA

Um den Abbrand von FLUFF unter realitätsnahen Bedingungen zu überprüfen, sollte die am KIT befindliche halbtechnische Versuchsanlage BRENDA für FLUFF-Feuerung umgerüstet werden.

- **Die Zielsetzung von AP5 wurde erreicht.**

AP6: Entwicklung eines optischen Messsystems zur Analyse des Zünd- und Abbrandverhaltens reagierender Partikel

Es sollten ein optisches Messsystem entwickelt werden, mit dem es möglich ist, die Trajektorien und Fluggeschwindigkeiten der Partikel während der Drehrohrversuche (AP9) zu ermitteln.

- **Die Zielsetzung von AP6 wurde erfüllt. Auf Basis einer Lichtfeldkamera wurde ein Messsystem entwickelt, das die Bestimmung von Partikeltrajektorien reagierender und nicht reagierender Partikel zulässt. Die Entwicklung neuartiger Auswertalgorithmen ermöglicht es, die „Precision“ bzw. den F₁-Score der Partikeldetektion auf über 94 % bzw. über 90 % zu steigern.**

AP7+AP8: Versuche an einem „heißen“ Fallschacht an reagierende Partikel im Flugstrom und Simulation der Versuche

Es sollten Versuche an reagierenden EBS-Partikeln unter möglichst definierten Randbedingungen durchgeführt werden (Fallschacht) bevor die Versuche in der strömungstechnisch komplexeren Konfiguration des Drehrohrs durchgeführt werden. Die Versuche sollten mittels CFD-Simulationen nachgerechnet werden.

- **Die Zielsetzung von AP7+8 wurde teilweise erfüllt. Versuche im Fallschacht wurden durchgeführt. Aufgrund der optischen Auflösung konnten nicht genügend Partikeltrajektorien gewonnen werden. Deshalb wurde auch auf eine CFD-Nachrechnung verzichtet. Die Anstrengungen wurden auf eine tiefere Analyse des realitätsnäheren Drehrohrs konzentriert (AP9+AP10).**

AP9 Verbrennungsversuche in einem halbtechnischen Drehrohr

Es sollten Versuche mit verschiedenen EBS-Frakturen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen im halbtechnischen Drehrohr der BRENDA durchgeführt werden sowie optisch die Trajektorien reagierender Partikel bestimmt werden.

- **Die Zielsetzung von AP9 wurde erfüllt. Es steht nun ein bisher einmaliger Datensatz zur Validierung von CFD-Simulationen öffentlich zur Verfügung. Dieser Datensatz enthält Trajektorien sowie örtlich aufgelöste Partikelgeschwindigkeiten und Partikelflugdauern sowie Zündzeitpunkte.**

AP10 Simulation der Drehrohrversuche und Modellabgleich, Anwendung auf ein Zementdrehrohr

Die Drehrohrversuche sollten nachgerechnet werden und damit die Güte der EBS-Simulationsmodelle überprüft werden. Beispielfähig sollten die Modelle auf eine Großanlage angewendet werden.

- **Die Zielsetzung von AP10 wurde erfüllt. Flugzeiten der EBS-Partikel bis zum Auftreffen auf die Drehrohrwand werden korrekt wiedergegeben ebenso wie Fluggeschwindigkeiten. Eine beispielhafte Großanlage wurde nachgerechnet.**

AP11 Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie der EBS-Datenbank, Veröffentlichung

Die Flug- und Abbrandmodelle sollten aufbereitet und für Dritte verständlich dokumentiert werden. Die EBS-Datenbank des LEAT sollte durch die Ergebnisse des Projektes ergänzt werden.

- **Die Zielsetzung von AP11 wurde erfüllt. Insbesondere steht nun eine umfangreiche, in dieser Form einmalige EBS-Datenbank öffentlich zu Verfügung.**

2.2 AP1: Brennstoffbeschaffung und Grundcharakterisierung (FS1, 2 PM, FS2, 2 PM)

Dieses Arbeitspaket diente dazu, grundlegende brennstoffspezifische Eigenschaften durch Laboranalysen zur ermitteln bevor eine erweiterte Charakterisierung des Brennstoffes hinsichtlich seiner Flugeigenschaften (siehe Kapitel 2.3) und seines Abbrandverhaltens (siehe Kapitel 2.4) stattgefunden hat.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der Brennstoff FLUFF beschafft und analysiert. Zunächst wurde die Zusammensetzung des FLUFFs durch die Entnahme von 15 Stichproben anhand eines bereits bewährten Sortierkatalogs (siehe IGF-Vorhaben Nr. 18862 N) untersucht. Anschließend wurden Immediat- und Elementaranalysen sowie Analysen mittels Kalorimetrie an den ermittelten Fraktionen durchgeführt. Zudem wurden die Modellfraktionen für die folgenden Versuchsreihen definiert.

Sortieranalyse

Der Brennstoff FLUFF ist ein stark heterogener Brennstoff (siehe Abbildung 3), dessen Zusammensetzung von essenzieller Bedeutung für die nachfolgenden Versuche/Simulationen ist. Große, schwere Kunststoffpartikel haben deutlich andere Flug- und Abbrandeigenschaften als beispielsweise Kohlestaubpartikel, die in guter Näherung als Massepunkt approximiert werden können. Um den Einfluss dieser Partikel auf die Auswirkungen im Zementklinkerbrennprozess bewerten zu können, ist es von entscheidender Bedeutung deren Anteil an der Gesamtzusammensetzung des Brennstoffes zu quantifizieren. Hierzu wurde eine händische, manuelle Sortierung des FLUFFs nach einem bewährten Sortierkatalog durchgeführt.



Abbildung 3. FLUFF.

Aus einem 50 l, mit FLUFF gefüllten, Fass wurden insgesamt 15 Stichproben entnommen und sortiert. Um möglichst repräsentative Informationen über die Grundgesamtheit zu bekommen, wurden die Proben aus verschiedenen Regionen des Fasses entnommen. Dieses wurde vor jeder Entnahme geschüttelt, um eine möglichst homogene Verteilung des Brennstoffes innerhalb des Fasses zu gewährleisten. Die Sortierung erfolgte dabei in Anlehnung an DIN 19747 und

19698-1, wobei ein größeres Haufwerk in kleinere unterteilt wird (Kegelverfahren). Dieser Prozess erfolgt so lange bis die gewünschte Größe des zu untersuchenden Haufwerks eingestellt wurde, aus dem dann die einzelnen Fraktionen entnommen wurden (siehe Abbildung 4). Der Teilungsprozess stellt sicher, dass die Zusammensetzung des entnommenen Probenmaterial möglichst repräsentativ zum ursprünglich aussortierten Haufwerk ist. Die Probenahme aus dem finalen Haufwerk erfolgt in Anlehnung an DIN 19698-1 und berücksichtigt die Entmischung von Schüttgütern nach Größe, Form und Dichte nach dem Schüttvorgang.

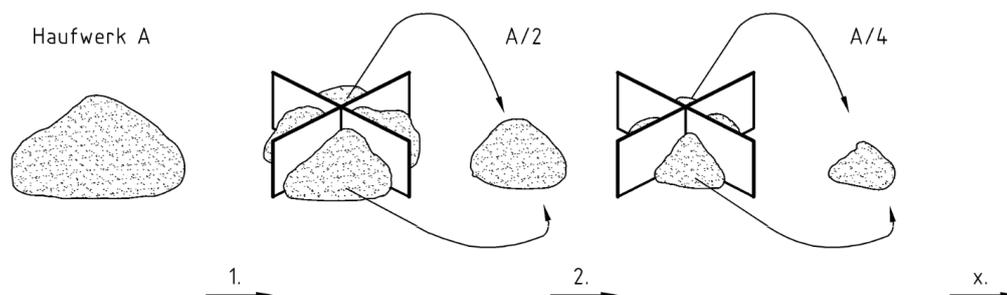


Abbildung 4. Kegelverfahren nach DIN 19747.

Die Subjektivität der Sortierenden hat Einfluss auf die Fraktionszuordnung. Um diesen Fehler möglichst gering zu halten, erfolgte die Sortieranalyse durch ein und dieselbe Person.

Brennstoffanalysen

Unter den Brennstoffanalysen werden die Immediat- und Elementaranalyse sowie die Kalorimetrie zusammengefasst. Allen Analysen geht die kryogene Zerkleinerung des Probenmaterials voraus. Durch die Immediat- bzw. Kurzanalyse wird die grundlegende Zusammensetzung des Brennstoffes charakterisiert (siehe Abbildung 5).

Die Immediatanalysen wurden nach den entsprechenden DIN-Normen (DIN EN 15414-3 zur Wasser-, DIN EN 15402 zur Flüchtigen- und DIN EN 15403 zur Aschegehaltsbestimmung) durchgeführt.

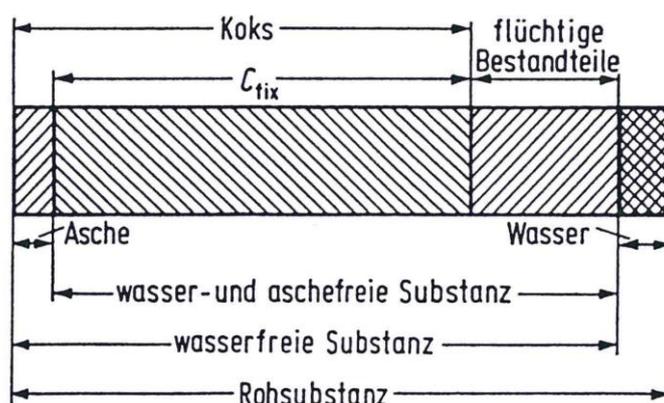


Abbildung 5. Zusammensetzung fester Brennstoffe [4].

Ergebnis der Sortieranalyse

Insgesamt wird die Brennstoffzusammensetzung von den synthetischen Fraktionen (Folien und 3D-Kunststoffe) und dem Rest/Feinanteil dominiert (siehe Abbildung 6). Letzterer ist als Anteil definiert, der durch das Sieb einer Maschenweite von 8 mm fällt. Diese Festlegung erfolgte bereits

in früheren Projekten und wurde zwecks der Vergleichbarkeit innerhalb dieses Projektes nicht geändert. Die Zusammensetzung des FLUFF variiert von Charge zu Charge. Es stellte sich heraus, dass die Fraktionen „Folie“ und „3D-Kunststoff“ zum Großteil zur Gesamtzusammensetzung beitragen. Fraktionen wie „Holz“, „Gummi“, „Inert“ usw. sind auch in anderen Sortieranalysen marginal vertreten. Es lassen sich die Fraktionen „Folie“, „3D-Kunststoff“, „Textil“, „PPK“ (Papier, Pappen und Kartonagen), „Verbund“ und „Rest/Fein“ als Hauptfraktionen identifizieren. Von diesen Fraktionen wurden im nächsten Schritt Brennstoffanalysen durchgeführt.

Ergebnis der Brennstoffanalysen

Wie zu erwarten, fällt der Wassergehalt bei den Kunststoffen gering und bei PPK sowie Textil hoch aus (siehe Abbildung 7). Der Fehlerbalken ist bei der Rest-/Feinfraktion am größten, da hier stofflich verschiedene Partikel zu einer Fraktion zusammengefasst werden. Die Kunststofffraktionen bestehen zu einem hohen Anteil aus flüchtigen Verbindungen und bilden vergleichsweise wenig Asche (siehe Abbildung 8 + Abbildung 9). Abbildung 10 unterstreicht dies, da die Kunststoffe über den geringsten Gehalt an fixem Kohlenstoff verfügen. Auf eine Darstellung der Rest/Feinfraktion wurde hier wegen der großen Variabilität der Immediatanalysen verzichtet.

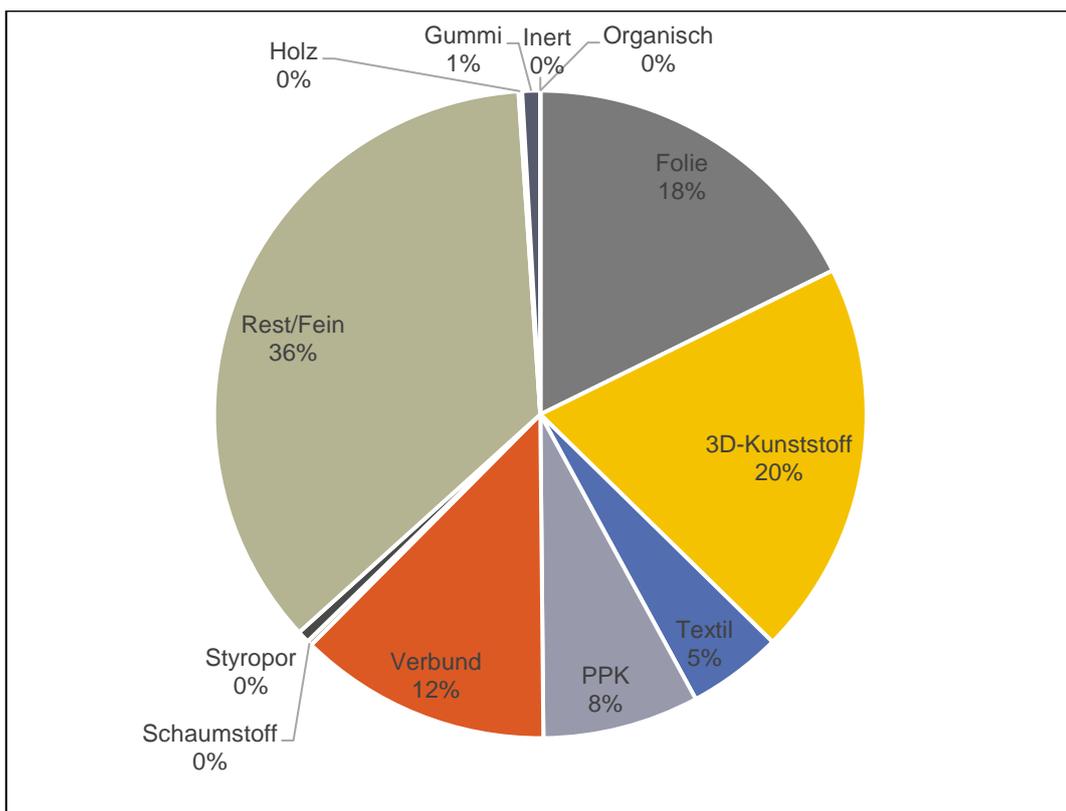


Abbildung 6. FLUFF-Zusammensetzung.

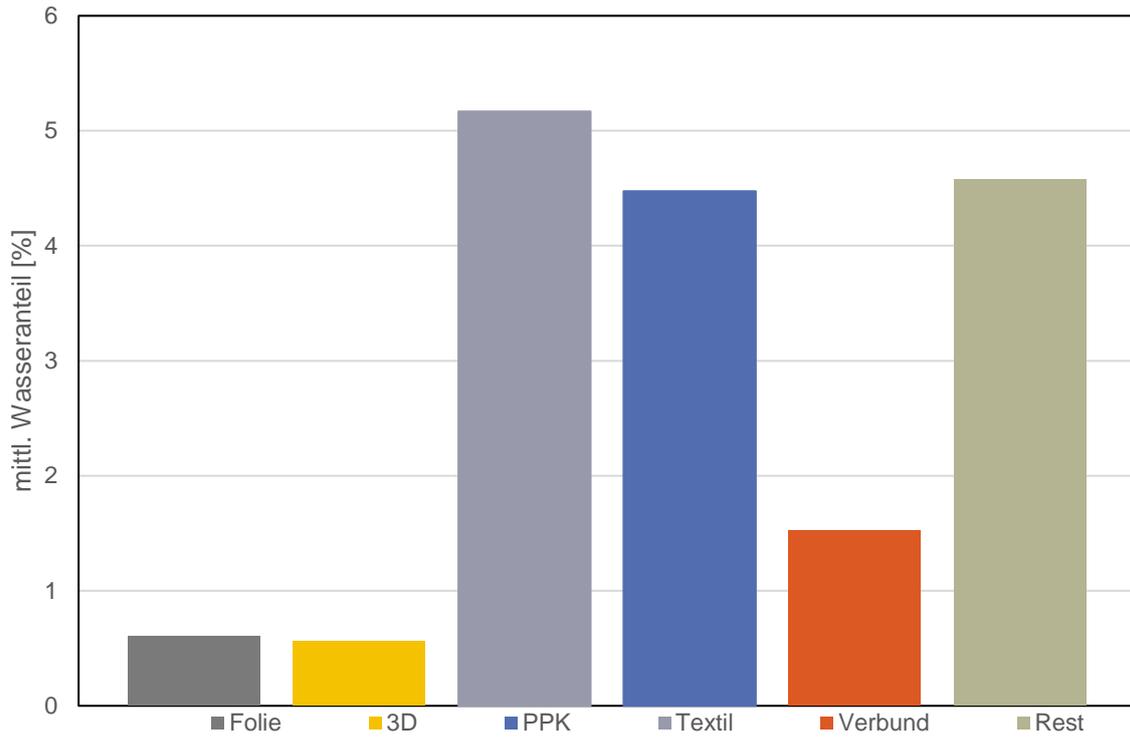


Abbildung 7. Ergebnisse der Bestimmung des Wassergehalts.

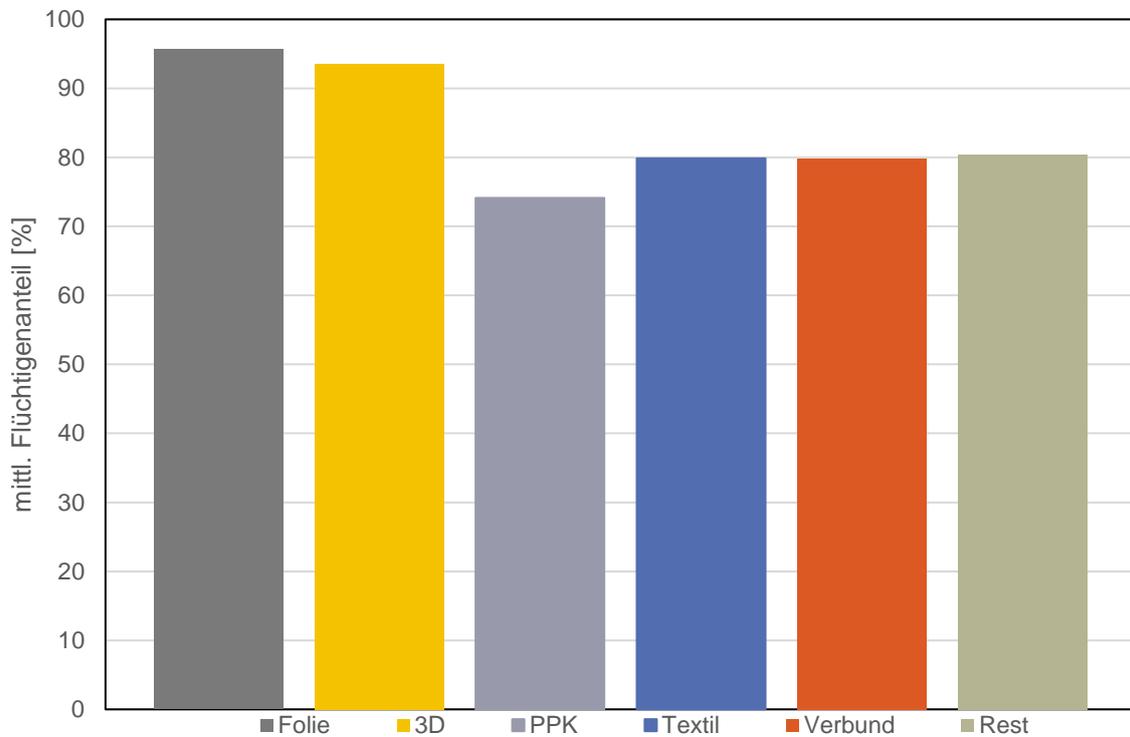


Abbildung 8. Ergebnisse der Bestimmung des Flüchtigengehalts.

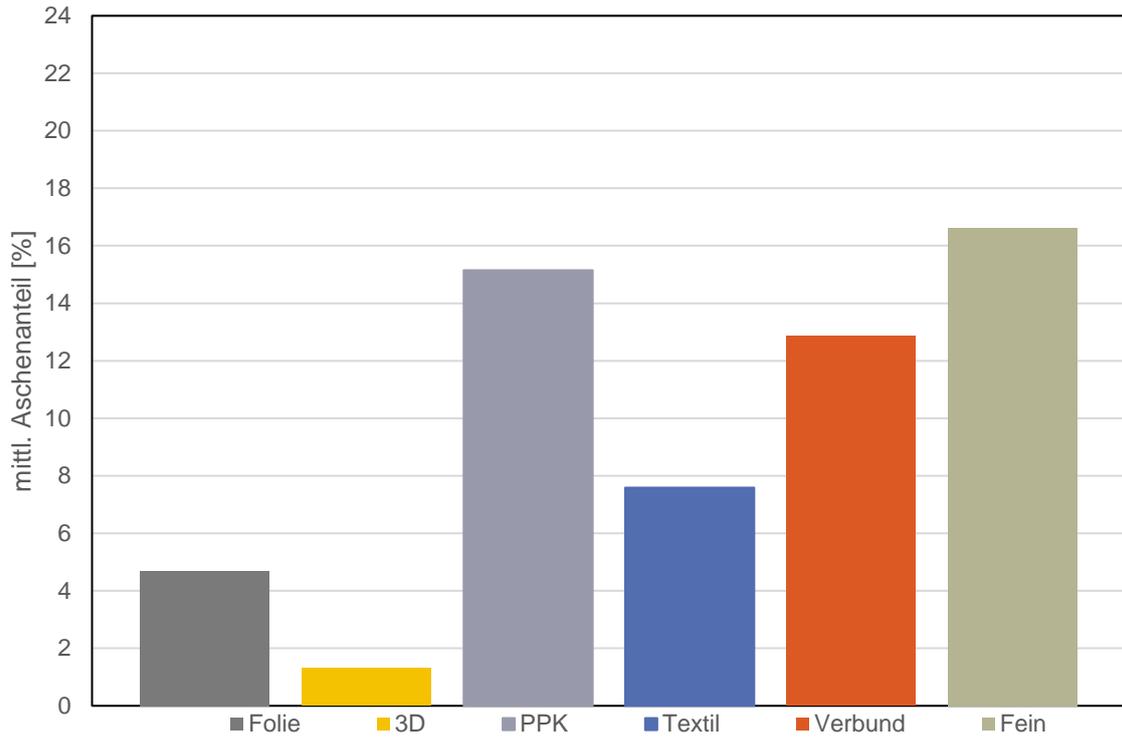


Abbildung 9. Ergebnisse der Bestimmung des Aschegehalts.

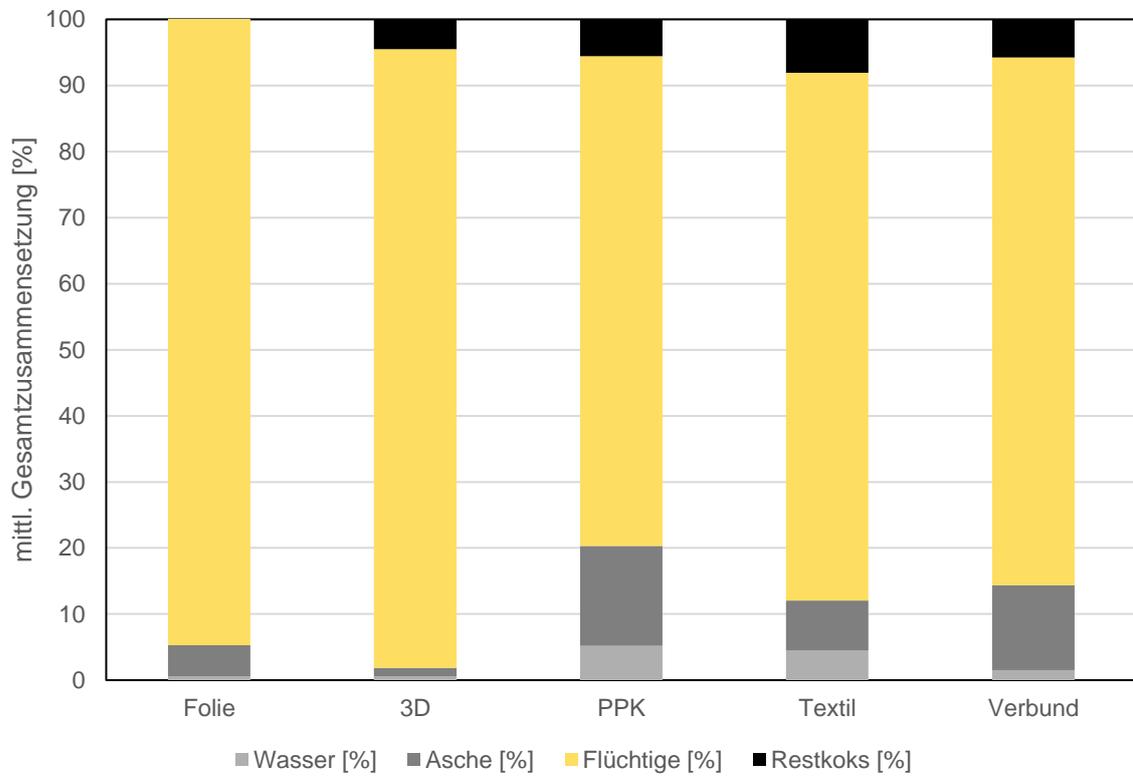


Abbildung 10. Zusammenfassung der Ergebnisse der Immediatanalyse.

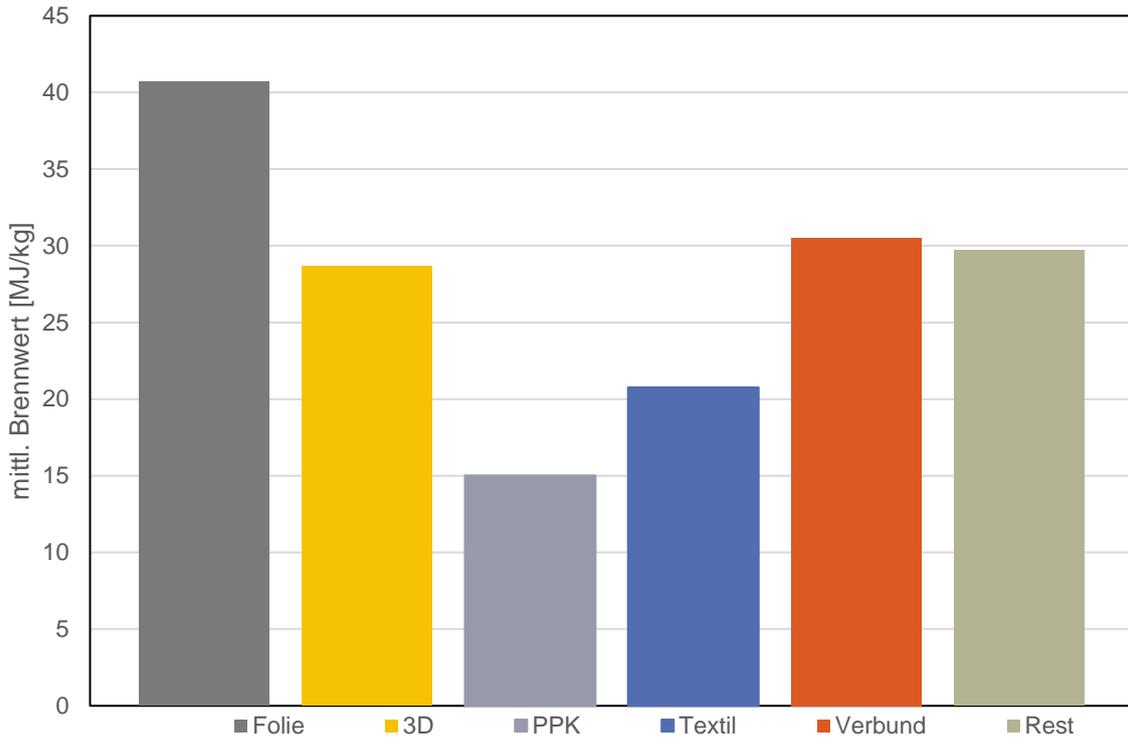


Abbildung 11. Ergebnisse der Kalorimetrie.

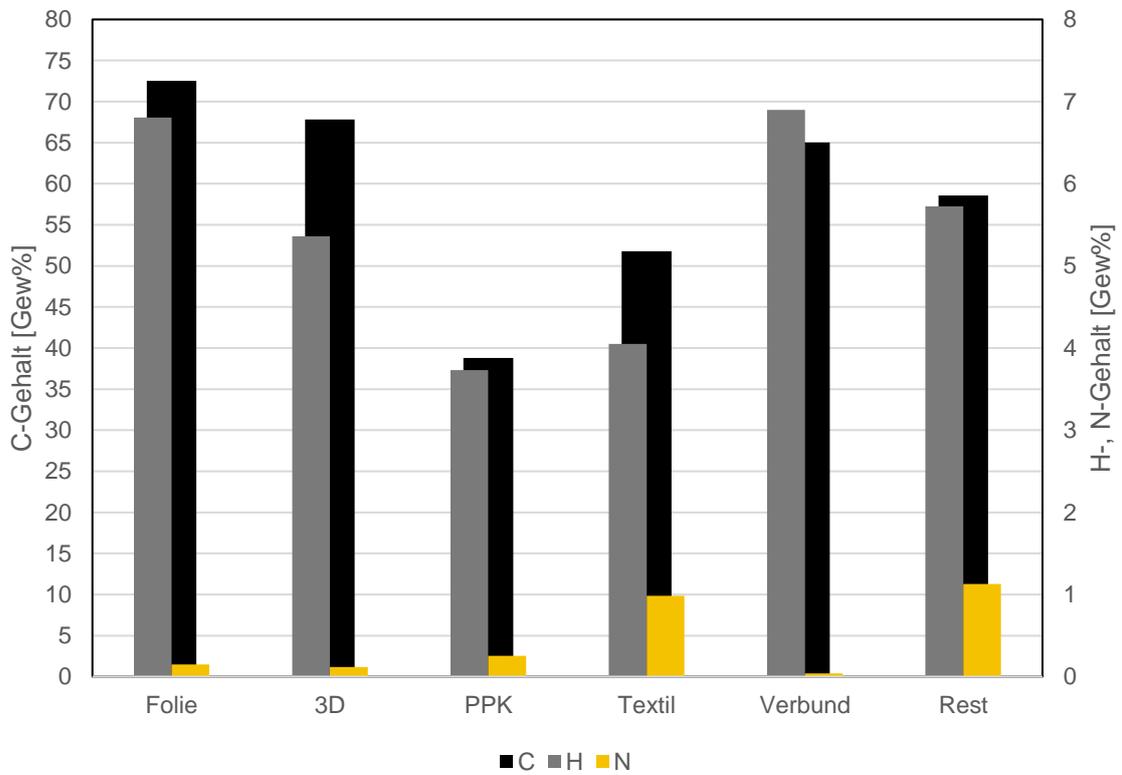


Abbildung 12. Ergebnisse der Elementaranalyse.

Der Brennwert fällt bei den Folien am größten aus (siehe Abbildung 11), was sich durch den vergleichsweise hohen Anteil an Kohlen- und Wasserstoff im Brennstoff erklären lässt (siehe Abbildung 12). Dieser Zusammenhang zwischen elementarer Zusammensetzung und Höhe des Brennwertes ist auch bei den restlichen Fraktionen wiederzufinden. Für die Elementaranalyse wurde eine speziell für FLUFF entwickelte Gerätekalibration durchgeführt. Diese berücksichtigt, im Gegensatz zu der bislang verwendeten, ursprünglich auf Kohle ausgerichteten Vorgehensweise, die verschiedenen Fraktionen des EBS und ihre unterschiedlichen Kohlen-, Wasser- und Stickstoffanteile.

Modellpartikel

Um einheitliche Geometrien der Partikel in Experimenten und Simulationen sicherzustellen, wurden innerhalb dieses Projekts Modellpartikel definiert. Folgende Partikel wurden in Anlehnung an die realen Hauptfraktionen des FLUFF bestimmt (siehe Abbildung 13 + Abbildung 14):

- Holzplättchen
- Konfetti
- Papierschnipsel
- PE-Granulat (Polyethylen)
- Plastikfolien

Die Holzplättchen repräsentieren dabei die restkoksbildenden Fraktionen wie PPK und Textilien. Das Konfetti steht für möglichst dünne Partikel ebenso wie die Papierschnipsel, wobei diese eine längliche Geometrie besitzen. Hier wurden ebenfalls restkoksbildende Partikel ausgewählt, wodurch eine längere Abbrandzeit besteht und sich die Trajektorien dieser Partikel in den Versuchen an der BRENDA Anlage besser verfolgen lassen. Das PE-Granulat wurde stellvertretend für die 3D-Kunststoffe ausgewählt. Die Plastikfolien sind aus einheitlichem Material und beschreiben die Fraktion Folie.



Abbildung 13. Restkoksbildende Modellpartikel (von links: Holzplättchen (Hackschnitzel), Konfetti, Papierschnipsel).



Abbildung 14. Synthetische Modellpartikel (von links: PE-Granulat, Plastikfolien).

2.3 AP2: Ermittlung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte an nicht-reagierenden Partikeln in einem Fallschacht (FS1, 6 PM)

Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit der Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften komplex geformter Partikel. Die Bestimmung von Widerstands- und Auftriebsbeiwerten mit Hilfe eines Fallschachtes ist erforderlich, um die Flugeigenschaften der FLUFF-Partikel innerhalb der CFD-Simulationen realistisch abzubilden. Der Fallschacht, wie er im Projektantrags beschrieben wurde, musste aus räumlichen Gründen am LEAT umgesetzt werden. In diesem Zuge wurde der Fallschacht modifiziert (Beleuchtung, Wandverkleidung), um die Partikelerkennung zu verbessern.

Durchgeführte Arbeiten

Es wurde ein Fallschachtsystem modifiziert und in betriebs genommen, das die Partikelgeometrie erfasst und Auskunft über das Flugverhalten der Partikel gibt. Zudem wurde das System um einen Röntgenfluoreszenzanalysator ergänzt, um einen stofflichen „Fingerprint“ der Partikel zu bekommen.

Geometrieerfassung

Eine ausreichend aufgelöste geometrische Charakterisierung der betrachteten Partikel ist die Voraussetzung für die anschließende Bestimmung von Widerstandsbeiwerten aus den Partikeltrajektorien. Gleichzeitig muss eine ausreichend große Anzahl von Partikeln berücksichtigt werden, was wiederum einen schnellen und zuverlässigen Ansatz zur Geometrieerfassung erfordert. Der im Antrag beschriebene 3D-Laserscanner ist, wie erste Erfahrungen damit zeigten, dazu nicht ausreichend.

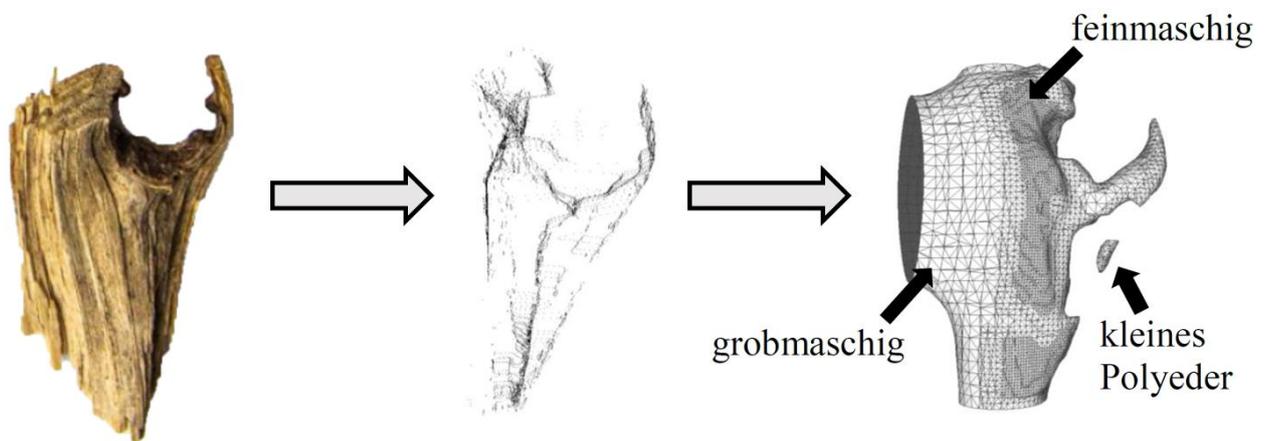


Abbildung 15. Demonstration der Tauglichkeit des 3D-Laserscanners nach [5].

Anhand eines Holzhackschnittzels, einer im Vergleich zu EBS-Partikeln einfachen Geometrie, wurde die Tauglichkeit des Laserscanners in Abbildung 15 überprüft. Auf der linken Seite ist das reale Partikel, mittig die aus dem 3D-Laser-Scan erzeugte Punktwolke des Hackschnittzels und auf der rechten Seite das daraus erzeugte Oberflächengitter abgebildet. Die links dargestellte Punktwolke wurde bereits nachbearbeitet, indem zusätzliche, nicht zum Partikel gehörige Strukturen, manuell entfernt wurden. Dennoch weist diese Punktwolke viele Schwachstellen auf, so sind „Löcher“ in der Punktwolke vorhanden und Teile der Geometrie sind abgeschnitten. Dies

zeigt, dass der vorhandene 3D-Laserscanner nicht in der Lage ist, ausreichend viele Merkmale für eine erfolgreiche Rekonstruktion der Punktwolke zu erfassen, was sich auch am erstellten Oberflächengitter (rechte Seite der Abbildung 15) zeigt. Deshalb wurde ein alternatives Verfahren, die Photogrammetrie, eingesetzt, das für die Detektion der EBS-Geometrie umfangreiche Entwicklungen in der Bildanalyse erforderte.

Die Photogrammetrie, insbesondere die "Structure from Motion"-Methode ist ein Verfahren, das charakteristische Punkte eines Objekts aus mehreren Bildern, die von einer Kamera aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen wurden, zur Erstellung eines 3D-Modells verwendet. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich die Kamera um ein feststehendes Objekt bewegt oder ob sich das Objekt vor einer feststehenden Kamera bewegt. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen klar die verbesserte Formwiedergabe im Vergleich zu dem im Antrag beschriebenen 3D-Laserscanner.

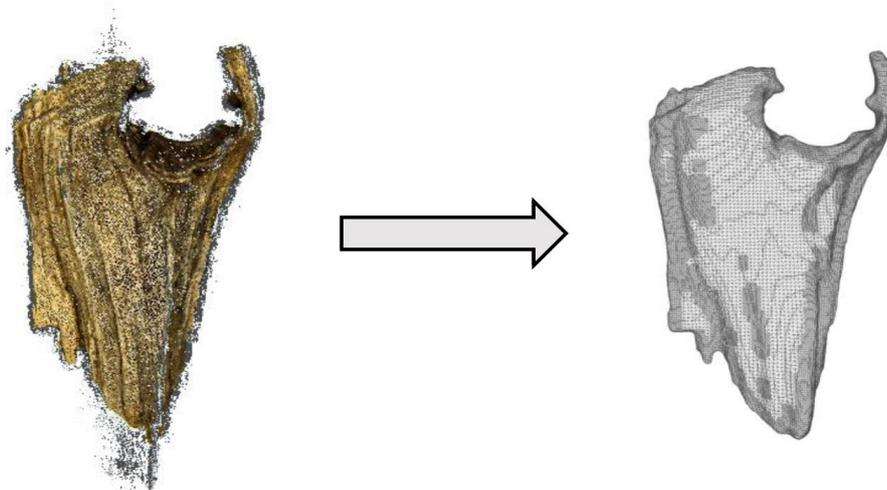


Abbildung 16. Photogrammetrisch rekonstruierte Punktwolke und Oberflächengitter [5].

Bei dem photogrammetrischen Verfahren wurde das gleiche Partikel wie beim 3D-Laserscan untersucht (siehe Abbildung 15). Die linke Seite von Abbildung 16 zeigt die Punktwolke des Holzhackschnitzels, die im Vergleich zu der aus dem 3D-Laserscan resultierten Punktwolke deutlich detaillierter ausfällt. Daher lässt sich ebenso ein deutlich detaillierteres Oberflächengitter erzeugen ohne etwaige Anomalien wie in Abbildung 15. Infolgedessen hat sich die „Structure from Motion“-Methode als geeignetes Verfahren für die Geometrieerfassung komplex geformter Partikel erwiesen. Für die 3D-Rekonstruktion eines Objekts mit der „Structure from Motion“-Methode werden drei Schritte durchgeführt.

Für die 3D-Geometrieerfassung und Überführung in ein digitales Objektmodell müssen im ersten Schritt charakteristische Merkmale (features, key points) der Bilder mit Hilfe des SIFT-Algorithmus von David Lowe [6] erkannt werden. Dabei wird ein Bild mit Hilfe des „Gaussian-Blurs“ in verschiedenen Stufen unscharf gemacht. Anschließend werden die Pixelwerte der verschiedenen Unschärfegrade voneinander subtrahiert, um die Keypoints zu lokalisieren. Diese Schlüsselpunkte sind Texturen oder Kanten des Objekts. Unter Berücksichtigung der Pixel, die einen Keypoint umgeben, kann ein numerischer Deskriptor ermittelt werden, der auf denselben Keypoint in verschiedenen Bildern verweist. Die Position eines Keypoints in Verbindung mit seinem Deskriptor wird in diesem Kontext als Feature bezeichnet.

Im zweiten Schritt werden die Merkmale verschiedener Bilder abgeglichen („Feature-Matching“). Für jede Merkmalsübereinstimmung werden mehrere verschiedene Bedingungen geprüft, um sicherzustellen, dass eine bestimmte Übereinstimmung mit einem vordefinierten Grad an Unsicherheit tatsächlich vorliegt. Erfüllen die Ergebnisse die festgelegten Bedingungen, wie z. B. die Einhaltung der maximal zulässigen Fehlergrenze für eine Übereinstimmung, wird ein Bildpaar gebildet. Die Bildpaare und die entsprechenden Übereinstimmungen werden dann für die folgende 3D-Rekonstruktion verwendet. Diese wird in erster Linie als „Sparse-Reconstruction“ durchgeführt. Die Sparse-Reconstruction verwendet die beim Feature-Matching gewonnenen Informationen, um die Kamerapositionen relativ zum Objekt für jedes Bild zu bestimmen. Daraus werden die Rotations- und Translationsvektoren für jede Kameraposition berechnet. Anschließend wird diese Information verwendet, um die „Sparse-Pointcloud“ in eine „Dense-Pointcloud“ umzuwandeln. Letztere verwendet im Gegensatz zur Sparse-Pointcloud Tiefenkarten aus den Stereokorrespondenzen der berechneten Kamerapositionen, um die Oberflächentextur des Objekts durch Berechnung der entsprechenden Punktnormalen und Verfeinerung der Oberflächenpunkte bestimmen zu können.

Im dritten Schritt wird entweder die Poisson-Oberflächenrekonstruktion für volumetrische Objekte oder der Alpha-Shape-Algorithmus für ebene Objekte wie Folien verwendet, um aus der Punktwolke eine Oberfläche zu erzeugen, die ein digitales Modell des ursprünglichen Objekts darstellt.

Abbildung 17 fasst die einzelnen Schritte zusammen. Während sich der Würfel um seine eigene Achse dreht, nimmt eine feststehende Kamera Bilder aus verschiedenen Richtungen auf. Merkmale (symbolisiert als rote Punkte, siehe linkes Bild) werden erkannt und zwischen den verschiedenen Bildern abgeglichen, um Bildpaare zu finden. Wenn der Merkmalsabgleich erfolgreich ist, wird ein Oberflächengitter berechnet, das diese Merkmale verbindet (siehe rechtes Bild). Wenn das Gitter geschlossen ist und das vom Oberflächengitter eingeschlossene Objekt als starrer Körper angenommen wird, werden der Schwerpunkt, das Volumen und der Trägheitstensor durch Integration über das digitalisierte Objekt berechnet.

Das Verfahren erfordert eine anfängliche Kalibrierung der Kamera mit Hilfe eines Schachbretts und der Zhang-Methode [7], um die intrinsischen Parameter und Verzerrungskoeffizienten zu erhalten, mit denen die aufgenommenen Bilder anschließend unverzerrt dargestellt werden. Anschließend werden die Bilder mit Hilfe einer Schwellenwertoperation in Binärbilder umgewandelt. In diesem Schritt wird das beleuchtete Partikel vom Hintergrund abgetrennt, um eine Maske um das Partikel zu erstellen. Die Merkmale werden nur innerhalb dieser Maske gesucht und erkannt. Durch die Trennung des Partikels vom Hintergrund wird sichergestellt, dass keine Merkmale versehentlich im Sichtfeld hinter dem Partikel erkannt werden.

Da nicht nur das Partikel im von der Maske eingeschlossenen Bereich enthalten ist und beleuchtete Teile der Partikelhalterung sichtbar sind, werden diese Artefakte im später beschriebenen Bearbeitungsprozess entfernt. Für die Kalibrierung und die Schwellenwertoperationen werden die von OpenCV bereitgestellten Algorithmen verwendet. Danach werden die Merkmale jedes aufgenommenen Bildes innerhalb des entsprechenden Bereichs extrahiert. Wenn der durch die Software COLMAP durchgeführte Merkmalsabgleich erfolgreich ist, wird eine Sparse-Pointcloud erstellt. Genaue Kamerapositionen sind in der Sparse-Reconstruction zwingend erforderlich, um eine präzise Dense-Pointcloud zu erstellen. Anschließend ist eine weitere Bearbeitung dieser Dense-Pointcloud erforderlich. Zunächst werden die durch den schwarzen Hintergrund verursachten Artefakte an den Rändern der Partikel entfernt. Zudem werden ebenso Ausreißer und Fragmente der Partikelmontage gelöscht.

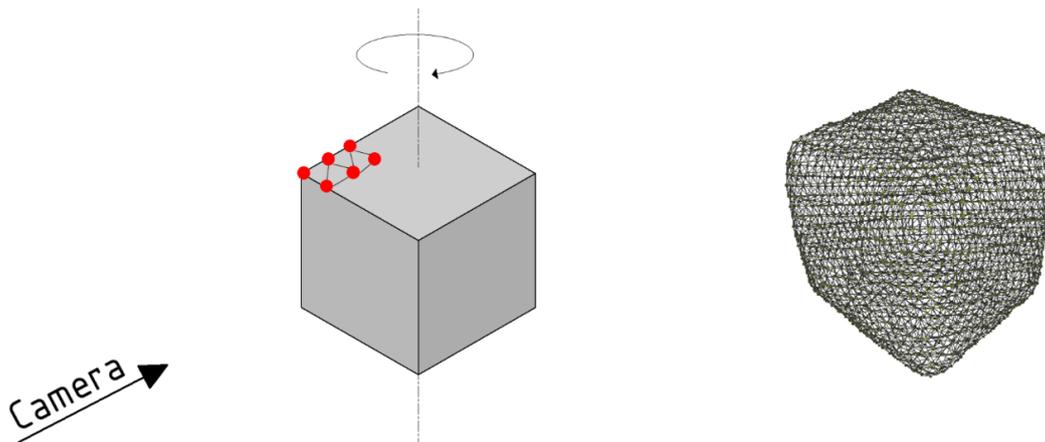


Abbildung 17. "Structure from Motion"-Methode [8].

In einem weiteren Schritt wird die Punktwolke mithilfe eines gleichmäßigen Voxel-Netzes erneut abgetastet, um einen Satz gleichmäßig verteilter Punkte zu erzeugen. Diese neue Punktwolke bewahrt die ursprüngliche Geometrie, während die Anzahl der Punkte reduziert wird, was die Oberflächenrekonstruktion beschleunigt. Wenn alle Parameter in der gewünschten Weise eingestellt sind, wird die Oberflächengittererstellung mit COLMAP (Poisson-Oberflächenrekonstruktion) oder Open3D (Alpha-Shape-Algorithmus) durchgeführt. Um das erhaltene Netz auf die tatsächliche Größe des Objekts zu skalieren, wird es abschließend durch einen Skalierungsfaktor angepasst. Dieser Wert ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Länge eines bekannten Referenzpolyeders und der entsprechenden tatsächlichen Länge des Referenzobjekts. Das Ergebnis ist ein geometrisches Modell welches im *.ply-Datenformat gespeichert wird.

Im nächsten Schritt wird um das Objekt herum eine Kugel mit einer vordefinierten Anzahl von nahezu gleichmäßig verteilten Oberflächenpunkten (Fibonacci-Kugel) erstellt. An diesen Positionen, die auf das Zentrum der Kugel zeigen, rendert eine "virtuelle Kamera" Szenen des Partikelmodells und zeichnet sie mit Open3D auf (siehe Abbildung 18 links; die roten und grünen Punkte in Abbildung 18 rechts sind ebenso Punkte der Fibonacci-Kugel und werden der Übersichtlichkeit halber nur um den Äquator herum dargestellt). Die gerenderten Bilder werden in Binärbilder umgewandelt und für einen späteren Vergleich mit den Bildern des tatsächlichen Partikels entlang seiner Flugbahn im Fallschacht gespeichert, um daraus die Partikelorientierung zu bestimmen.

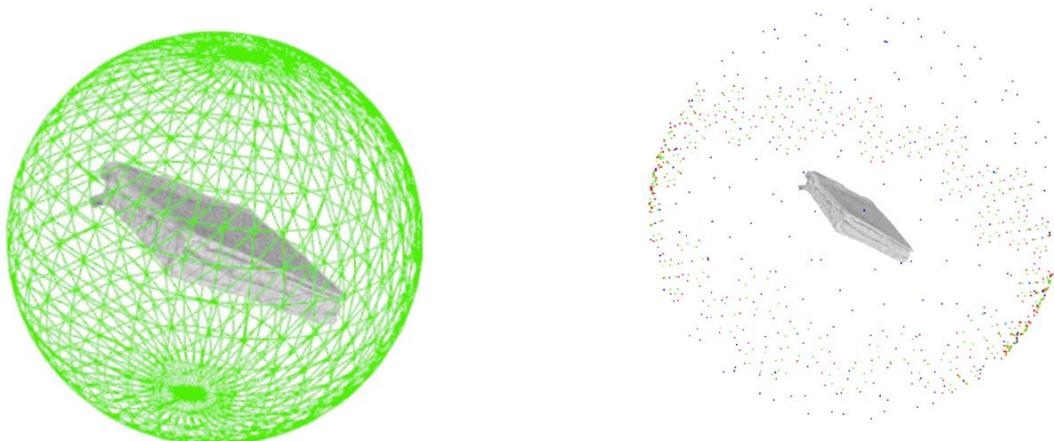


Abbildung 18. Fibonacci-Kugel und Positionierung der virtuellen Kamera [8].

Photogrammetrie-Station

Es wurde eine völlig neue Station zur Erfassung der Partikelgeometrie nach der oben beschriebenen Methode errichtet. Das Partikel ist darin auf einer Halterung befestigt, die von einem Schrittmotor angetrieben wird. Ein weiterer Schrittmotor außerhalb des Innenraums (nicht in Abbildung 19 dargestellt) treibt die Halterung zusätzlich um eine andere Achse an. Auf diese Weise werden viele Ausrichtungen des Partikels erfasst, um so viele Merkmale wie möglich für eine genaue 3D-Rekonstruktion zu erhalten. Für die Aufnahme der Bilder wird eine Polarisationskamera (2448 x 2048 px) verwendet, um die Reflexion der Partikeloberfläche zu reduzieren. Die Kamera wird in Kombination mit einem Objektiv mit einer Brennweite von 35 mm verwendet. Der Abstand zwischen der Kamera und dem Partikel kann je nach Partikelgröße flexibel eingestellt werden. Um die richtigen Lichtverhältnisse zu schaffen, wurden LED-Streifen an den Wänden um die Kamera herum und an der Wand rechts davon angebracht. Außerdem sind die Innenwände weiß gestrichen, um das von den LED-Modulen ausgestrahlte Licht zu reflektieren und eine gleichmäßige Beleuchtung zu gewährleisten. Nur die Wand gegenüber der Kamera ist schwarz gestrichen, um einen maximalen Kontrast zwischen dem Hintergrund und dem beleuchteten Partikel zu erzielen.

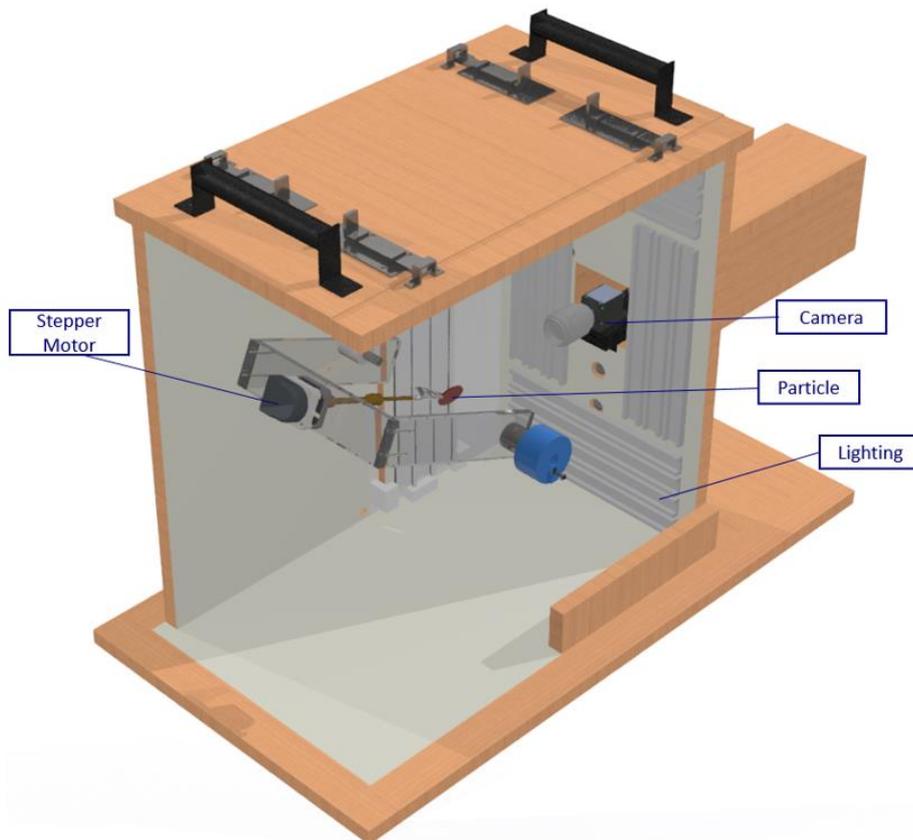


Abbildung 19. Photogrammetrie-Station [8].

Analyse des Flugverhaltens

Stereobildverarbeitungsanwendungen („Stereo Vision“) erfordern zwei Kameras zur Bestimmung von Tiefeninformationen. Das Prinzip des Stereobildes basiert auf Strahlensätzen und dem Modell der Lochkamera. Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Parametern eines Stereopaars in der x- und y-Ebene (siehe Abbildung 20 links) sind in den folgenden Gleichungen

dargestellt. Am einfachsten lassen sich die Grundlagen erklären, wenn dieselbe Grundlinie vorliegt und der Ursprung des Koordinatensystems in das optische Zentrum von Kamera 1 gesetzt wird. Um die Abstände x_p und y_p der Kameras zum Objekt zu berechnen, müssen der Abstand b zwischen den Kameras und die Brennweite f der Kameras bekannt sein. Das Objekt wird durch einen entsprechenden Pixel auf der Sensorebene (rot symbolisiert) der Kameras dargestellt. Die auf den Sensor auftreffenden Lichtstrahlen erzeugen ein auf den Kopf gedrehtes Bild der Realität. Die Kamera wandelt die Bilder um und stellt diese in der Bildebene (blau symbolisiert) korrekt dar. Der Abstand zwischen dem entsprechenden Pixel und dem optischen Zentrum der Kamera ist durch p_l bzw. p_r gegeben, die durch die Gleichungen 1 und 2 berechnet werden können.

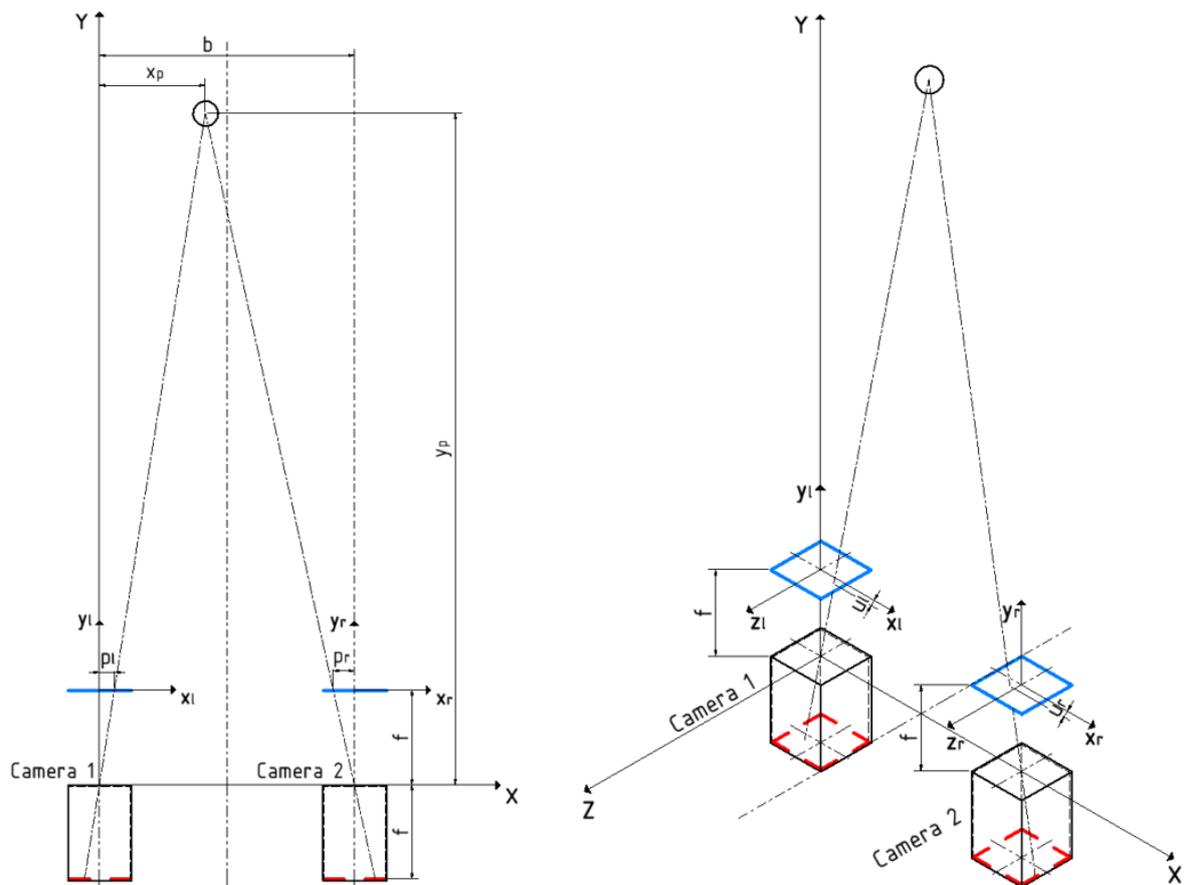


Abbildung 20. Stereo-Vision im zwei- und dreidimensionalen Raum [8].

$$p_l = \frac{x_p}{y_p} \cdot f \quad (1)$$

$$p_r = \frac{b - x_p}{y_p} \cdot f \quad (2)$$

Wobei die Disparität d in Gleichung 3 definiert ist.

$$d = p_l - p_r \quad (3)$$

Die Strecke y_p , die Tiefeninformationen enthält, wird durch Gleichung 4 unter Verwendung der Gleichung 1 und 2 erhalten.

$$y_p = \frac{b \cdot f}{d} \quad (4)$$

Die Kenntnis über die Tiefe ermöglicht es, die Strecken x_p und z_p (siehe rechtes Bild in Abbildung 20; aus Gründen der Übersichtlichkeit ist z_p nicht dargestellt) zu bestimmen.

$$x_p = \frac{y_p}{f} \cdot p_l \quad (5)$$

$$z_p = \frac{y_p}{f} \cdot u_l \quad (6)$$

Die aus den Gleichungen 4 bis 6 abgeleitete Position des Objekts in jedem Bild wird zur Berechnung der Geschwindigkeit in den verschiedenen Raumrichtungen verwendet. Zu diesem Zweck werden die Positionsdaten des aktuellen Bildes mit dem nachfolgenden Bild verglichen und mit der Bildrate der Kameras multipliziert, um die Geschwindigkeit des Objekts zu berechnen. Der Buchstabe n steht für den aktuellen Bildindex und c für die Anzahl der Bilder pro Sekunde oder Frames pro Sekunde (fps), die so genannte Framerate (siehe Gleichung 7).

$$\vec{v}_p = \begin{pmatrix} y_p^{n+1} - y_p^n \\ x_p^{n+1} - x_p^n \\ z_p^{n+1} - z_p^n \end{pmatrix} \cdot c \quad (7)$$

Das stereoskopische Kamerasystem wird vor einer Messreihe kalibriert. Für die Kalibrierung der beiden Kameras wird die Schachbrettmethode verwendet. Darüber hinaus werden eine Stereokalibrierung und eine Stereorektifizierung durchgeführt, bei der die von beiden Kameras aufgenommenen Bilder mathematisch ausgerichtet werden, um eine hochpräzise Tiefenmessung zu ermöglichen. Die von den beiden Kameras aufgenommenen Bilder werden in Binärbilder umgewandelt. Durch Bildung des Verhältnisses zwischen den in x- oder y-Richtung gezählten weißen Pixeln in Bezug auf ihre Position auf dem Sensor und der Anzahl der insgesamt gezählten weißen Pixel wird die Position des geometrischen Mittelpunkts des Partikels auf dem Sensor berechnet. Das Ergebnis der Fallschachtexperimente sind Trajektorien und eine Geschwindigkeitsverteilung der untersuchten Partikel.

Fallschacht

Im modifizierten Fallschacht werden die aerodynamischen Eigenschaften eines breiten Spektrums und einer großen Anzahl von Partikeln (in diesem Fall FLUFF) analysiert. Zu diesem Zweck werden einzelne Partikel (nach ihrer Charakterisierung) über ein Förderband (in Abbildung 21 nicht dargestellt) in den oberen Teil des Fallschachts transportiert und fallen dann durch ein Rohr in das Innere, wo die Flugbahnen der Partikel, wie oben erläutert, von zwei stereoskopisch angeordneten Kameras erfasst werden.

Die zusätzliche Strecke, die das Rohr bietet, wird genutzt, um die Partikel nahezu auf ihre Endgeschwindigkeit zu beschleunigen, bevor sie von den Kameras erfasst werden. Die Wände im Inneren des Fallschachts sind geschlossen und schwarz gestrichen. In Kombination mit dem Beleuchtungssystem, das oben am Fallschacht angebracht ist, kann ein hoher Kontrast zwischen

den beleuchteten Partikeln und dem schwarzen Hintergrund erzielt werden. Dies ist für eine genaue Erkennung der Partikelposition unerlässlich. Außerdem ist am unteren Ende des Fallschachts eine Schublade mit geneigten Blenden angebracht. Trifft ein Partikel auf die Schublade, wird es entlang der Blenden in das Innere der Schublade geleitet und ist danach für die Kameras nicht mehr zu erkennen. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, dass jeweils nur ein Partikel beim Durchgang durch den Fallschacht von den Kameras erfasst wird. Der Gesamtabstand zwischen der Oberkante der Schublade und dem Aufstellungsort der Kameras beträgt 4,8 m, die Querschnittsfläche im Fallschacht ist 0,83 m x 0,83 m.

Die beiden, eigens für dieses Projekt beschafften, identischen Hochgeschwindigkeitskameras (mit Full-HD-Auflösung und 500 fps) werden zur Bildaufzeichnung verwendet. Durch die hohe Bildaufzeichnungsrate wird eine zehnfach höhere zeitliche Auflösung der Partikelbewegung im Vergleich zum ursprünglichen System bewirkt. Beide Kameras sind an identischen x-Achsen ausgerichtet und haben die gleiche Position in Bezug auf ihre z-Achse und y-Achse. Letztere wird so ausgerichtet, dass die Eintrittspupille der beiden identischen Objektive ($f = 4,8$ mm) in der Ebene liegt, die von den oberen Kanten des Fallschachtgerüsts aufgespannt wird (siehe Abbildung 21). Die Eintrittspupille wird als Referenz für Entfernungsmessungen bei Objektiven mit Blende verwendet.

Vorgehen zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften

Nach dem Eintritt in den Fallschacht fällt das Teilchen durch den Schacht und seine Flugbahn wird aufgezeichnet. Je nach Masse und Geometrie können diese Bahnen erheblich variieren, und selbst bei einem identischen Partikel kommt es zu einer stochastischen Variation von Bahn zu Bahn. Um die Häufigkeitsverteilung der zugrundeliegenden Widerstands- und Auftriebskoeffizienten entlang der Flugbahnen zu erhalten, müssen die Positionen, Orientierungen, Geschwindigkeiten und die zugehörigen Strömungsflächen aus den stereoskopischen Bildsequenzen abgeleitet werden. Im Vergleich zum Vorgängersystem wurde hier bewusst für eine komplette Neuprogrammierung der Auswerteroutinen vorgenommen. Zum einen unterschätzt der alte Ansatz laut [1] die ermittelten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte. Zum anderen bietet sich mit der genaueren Geometrieerfassung durch die Photogrammetrie eine präzisere Bestimmung der tatsächlichen Anströmfläche. Die Ausgangsdaten der photogrammetrischen Untersuchungen und der Fallschachtversuche werden in einem „Shape Matching“ kombiniert, das die Form des 3D-Modells mit der Form des realen Partikels im Fallschacht vergleicht. Zu diesem Zweck werden die binarisierten Bilder zugeschnitten und mit den aus dem 3D-Modell gerenderten Bildern unter Verwendung von OpenCV verglichen.

Letzteres wird mit Hilfe der Hu-Momente [9] durchgeführt. Da jedoch die Ausrichtung der Partikel wichtig ist, wird der vorangegangene Algorithmus um eine Berechnung erweitert, bei der die Ausrichtung der vom Fallschacht stammenden Partikelbilder mit den gerenderten, größenveränderten Bildern der Szenenpositionierung (siehe Abbildung 18) verglichen wird. Dazu wird nach dem niedrigst- und höchstgelegenen weißen Pixel im ausgeschnittenen Fallschachtbild und im gerenderten Bild gesucht. Anschließend wird eine Linie zwischen diesen Pixeln erstellt und ein Winkel zwischen dieser Linie und einer horizontalen Linie berechnet. Wenn der aus dem Hu-Moment-Vergleich erhaltene Abstand, multipliziert mit der Differenz der berechneten Winkel, so minimal und nicht negativ ist, wird das jeweilig gerenderte Bild der aktuellen Partikelorientierung im Fallschacht zugeordnet (siehe Abbildung 22). Wenn die Zuordnung der gerenderten Bilder zu den aus dem Fallschacht stammenden Bildern abgeschlossen ist, wird die Anströmfläche bestimmt. Dies geschieht durch Projektion der

Richtung des Geschwindigkeitsvektors vom aktuellen Punkt auf der Fibonacci-Kugel (der die aktuelle Zuordnung zum korrespondierenden Fallschachtbild darstellt) auf einen neuen Punkt der Kugeloberfläche. Dann wird die Blickrichtung vom neuen Punkt in Richtung des Mittelpunktes des Partikels ausgerichtet. Der Bereich, den die virtuelle Kamera nun sieht, entspricht der Anströmfläche. Der Wert der Anströmfläche wird mit Hilfe des Dreisatzes berechnet. Dazu werden die weißen gezählten Pixel der Anströmfläche in das Verhältnis zu einer bekannten, aus der photogrammetrischen Analyse abgeleiteten Referenzanzahl weißer Pixel gesetzt und mit der entsprechenden bekannten Fläche eines Referenzobjektes multipliziert. Mit dieser Methode erhält man die Anströmfläche, die mit dem Stereopaar nicht zu sehen ist. Aus Geschwindigkeit und Anströmfläche lassen sich danach die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte berechnen.

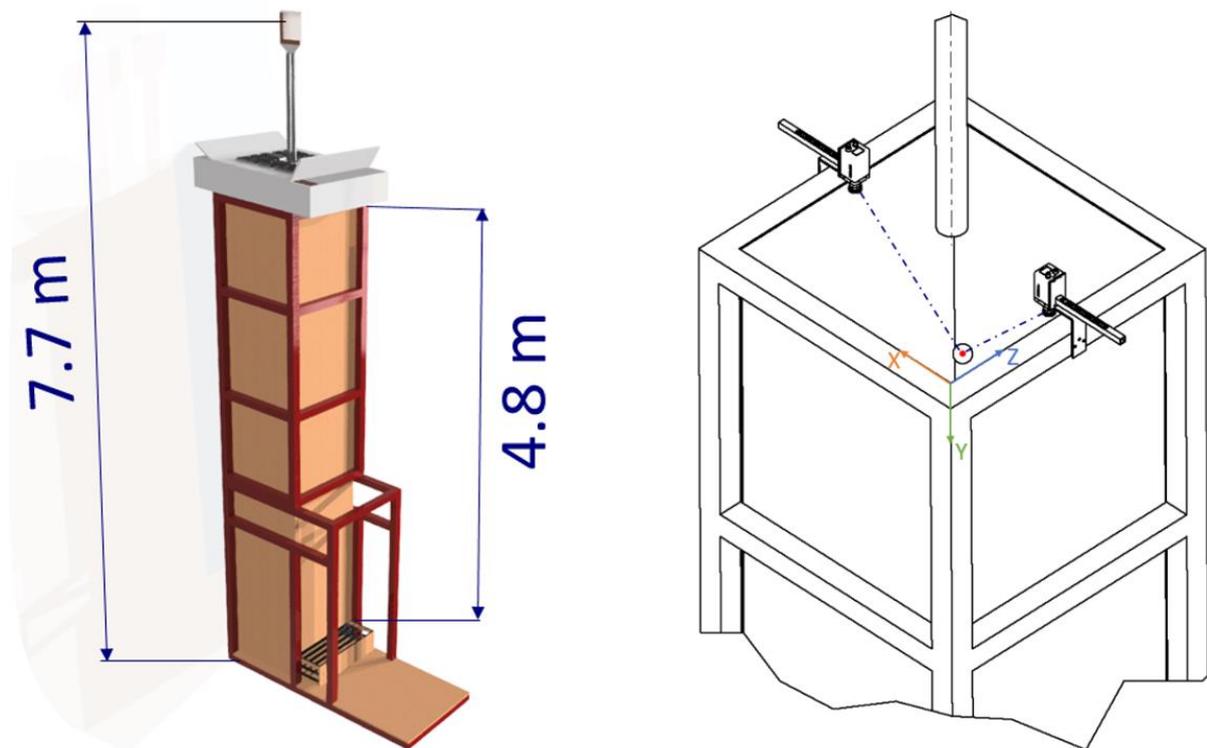


Abbildung 21. Fallschacht [8].

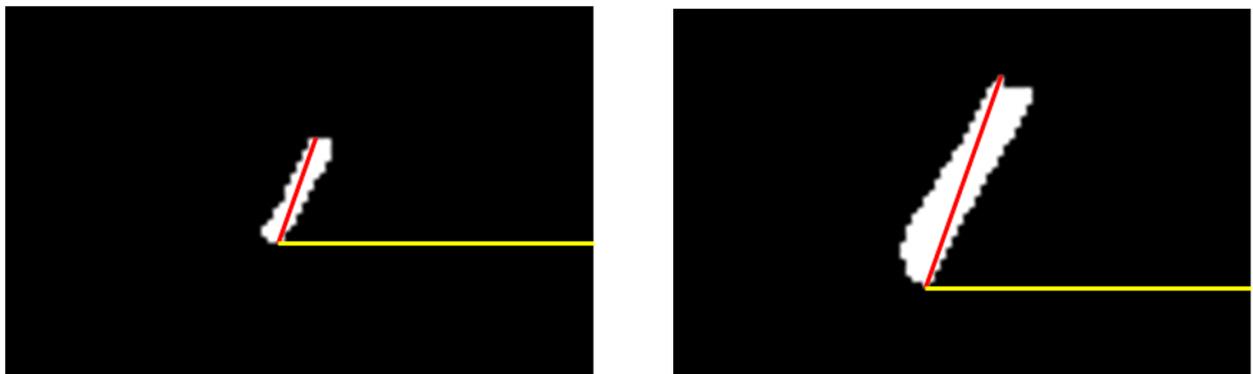


Abbildung 22. Shape-Matching und Orientierungsabgleich [8].

Röntgenfluoreszenzanalysator

Der in diesem Projekt beschaffte Röntgenfluoreszenzanalysator (RFA) dient dazu, einen stofflichen „Fingerprint“ der Partikel zu erhalten und ergänzt das Fallschachtsystem. Dadurch lassen sich Elemente wie Calcium, Titan und Chlor detektiert, die im Rahmen der Elementaranalyse (siehe Kapitel 2.2) nicht erfasst werden können. Durch den zusätzlich gewonnenen Informationsgehalt lassen sich bspw. Zusammenhänge zwischen im Partikel enthaltenen Elementen und dem Abbrandverhalten der Partikel aufstellen. Die Inbetriebnahme der RFA unterlag eines ordnungsrechtlichen Genehmigungsverfahrens und erforderte einen Strahlenschutzlehrgang für den Projektbearbeiter, um einen rechtsgültigen und sicheren Betrieb des Gerätes zu gewährleisten.

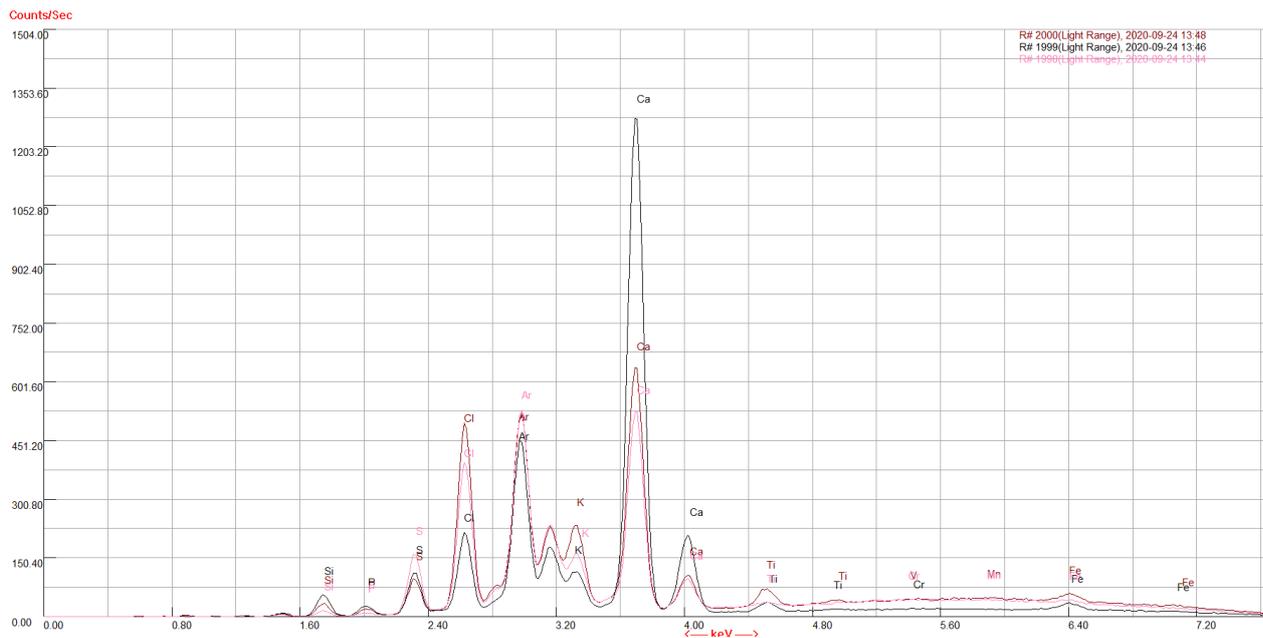


Abbildung 23. RFA-Spektrum.

Insgesamt wurden über 300 Partikel analysiert. Ein typisches Spektrum zeigt Abbildung 23. Die Höhe des Peaks ist dabei ein Maß für den Gehalt des jeweiligen Elements in der Probe.

Erzielte Ergebnisse

Ergebnis der Geometrieerfassung

Mittels der Photogrammetrie-Station lassen sich die komplexen EBS-Partikelgeometrien in ein 3D-Modell (siehe Abbildung 24 + Abbildung 25) überführen. Durch den Vergleich des Volumens einer bekannten Geometrie, mit dem aus dem 3D-Modell abgeleiteten Volumen, wird die Genauigkeit des Systems bewertet (siehe Tabelle 1). Der Buchstabe a steht für die Seitenlänge des Würfels. Das durch das 3D-Modell berechnete Volumen weicht um 11,55 % vom realen Volumen ab. Dennoch lässt sich die Geometrie der Partikel im Vergleich zur bisherigen Methode (Erfassung der Geometrie vor dem Fall aus zwei Blickrichtungen) und ebenso hinsichtlich des im Projektantrags vorgeschlagenen 3D-Laserscanners deutlich besser erfassen.

Tabelle 1. Genauigkeit der Volumenbestimmung.

Geometrie	Volumen [mm ³]	Verwendete Parameter
Würfel	8000	$a_{\text{Würfel}} = 20 \text{ mm}$
3D-Model eines Würfels	9045	
Abweichung [%]	11,55	

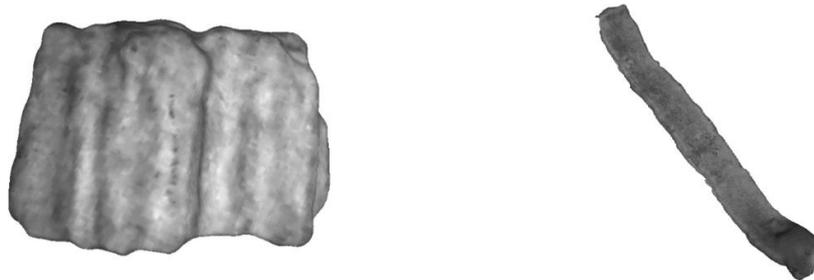


Abbildung 24. 3D-Modelle der Modellartikel Holzplättchen und Papierschnipsel.



Abbildung 25. 3D-Modelle der EBS-Partikel PPK und 3D-Kunststoff.

Durch die dreidimensionale Erfassung der Partikelgeometrie wurden folgende Größen bestimmt:

- Oberflächeninhalt
- Volumen
- Trägheitstensor
- Hauptträgheitsachsen
- Hauptträgheitsmomente
- Schwerpunkt

Diese Parameter lassen sich, ebenso wie die im nächsten Kapitel bestimmten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte, statistisch den jeweiligen Partikeln in den Simulationen zuordnen.

Ergebnis der Analyse des Flugverhaltens

Für eine korrekte Schätzung des Widerstands- und Auftriebskoeffizienten ist eine genaue Messung der Partikelposition erforderlich. Zu diesem Zweck wird eine weiße Styroporkugel an einem Faden unterschiedlicher Länge befestigt. Dann wird die Styroporkugel in verschiedenen Abständen zu den Kameras platziert. Durch die Positionsmessung durch die Kameras kann die Genauigkeit der Partikeldetektion beurteilt werden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2. Genauigkeit der Partikeldetektion.

Fadenlänge Styroporkugel [mm]	Fallschacht Detektion [mm]	Abweichung [%]
600	595,065	0,82
900	883,04	1,88
1200	1170,51	2,46
1500	1459,13	2,72
1800	1746,17	2,99
2100	2048,4	2,46
3000	2878,83	4,04
4000	3821,27	4,47
Mittlere Abweichung		2,73

Das Ergebnis von Tabelle 2 zeigt die Position der nicht bewegten Styroporkugel mit einem Durchmesser von 30 mm in y-Richtung. Die Position wird bis zu einer Entfernung von 4,0 m mit einer durchschnittlichen Abweichung von 2,73 % bestimmt. Darüber hinaus wird die Partikelerkennung schlechter, je weiter die Partikel von den Kameras entfernt sind.

Dieser Zusammenhang spiegelt sich vor allem in den vertikalen Geschwindigkeiten y_v wider. Die Styroporkugel tritt fast mit ihrer Endgeschwindigkeit in den Fallschacht ein. Aufgrund ihrer Geometrie sollte die Kugel gleichmäßig umströmt werden und der Schwerpunkt in der Mitte der Kugel liegen. Vernachlässigt man die Effekte von Wirbeln, so gilt die Annahme einer konstanten Vertikalgeschwindigkeit. Abbildung 26 zeigt jedoch eine Geschwindigkeitsschwankung, die mit zunehmendem Abstand zu den Kameras ausgeprägter wird. Die Schwankung wird größer, wenn der Abstand zu den Kameras größer wird. Der Bereich bis ca. 2 m zeigt die geringste Abweichung im Vergleich zu den anderen Abschnitten (siehe Abbildung 26). Durch Mittelwertbildung der in Abbildung 26 dargestellten Geschwindigkeitswerte und Vergleich mit der theoretischen Endgeschwindigkeit der Styroporkugel (Gleichgewicht zwischen der Widerstandskraft und der Gewichtskraft) wird die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung überprüft. Einen Vergleich der theoretischen „Gleichgewichts-Geschwindigkeit“ mit der tatsächlich gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeit zeigt Tabelle 3. Die Abweichung von lediglich 0,5 % ist als sehr gut zu bezeichnen. Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind ebenfalls in Tabelle 4 zu finden (wobei m für die Masse, d für den Durchmesser, ρ für die Dichte und c_w für den Widerstandsbeiwert steht).

Durch Kombination der photogrammetrischen Untersuchungen (Geometrieerfassung) mit den Fallschachtexperimenten (Trajektorien + Geschwindigkeit) unter Hinzunahme der oben beschriebenen Algorithmen zur Bestimmung der Anströmfläche ist es möglich, die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte von Partikeln zu bestimmen. Dabei können nicht nur die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einfacher Geometrien ermittelt werden, wie die einer Kugel oder eines Zylinders (siehe Abbildung 28; die Daten stimmen mit der Literatur überein [10]), sondern ebenso von Modellpartikeln (siehe Abbildung 24 + Abbildung 29) und realer FLUFF-Partikel (siehe Abbildung 25 + Abbildung 30). Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen ebenso die statistische Verteilung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einzelner FLUFF-Fractionen.

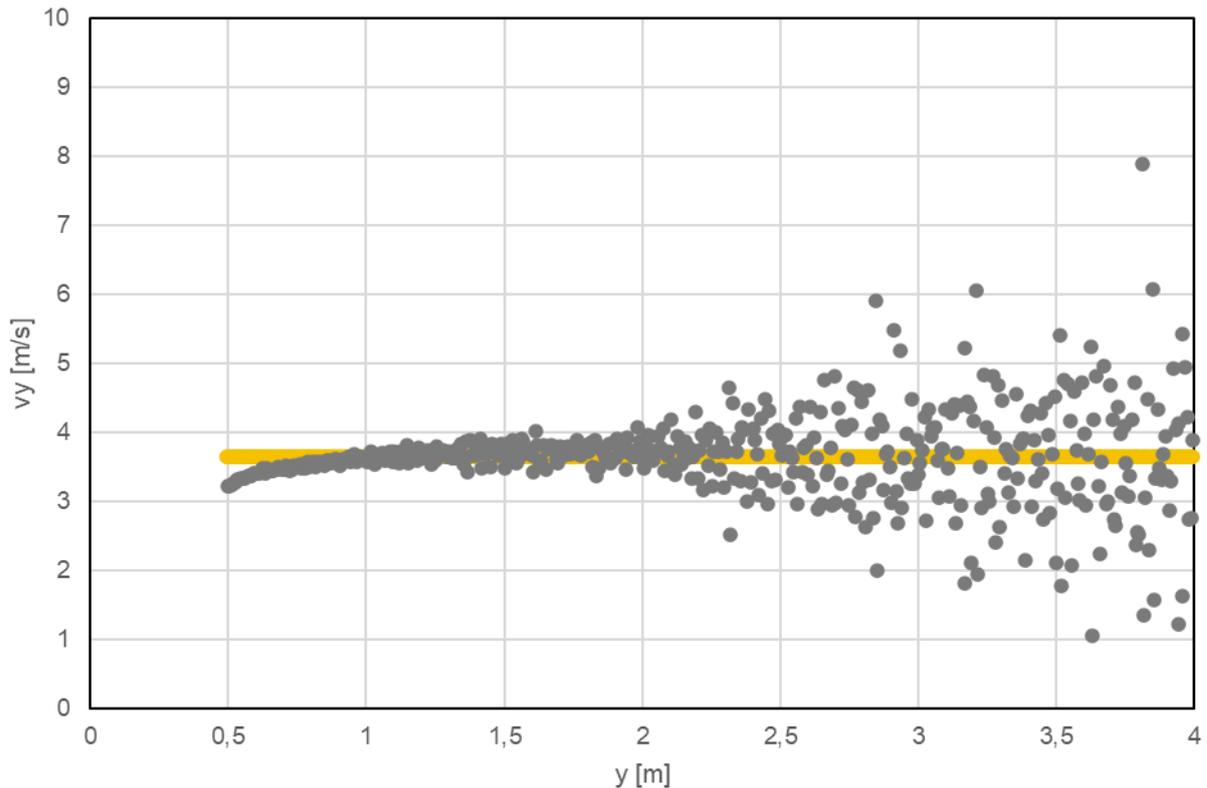


Abbildung 26. Ermittelte Sinkgeschwindigkeit einer Kugel [8].

Tabelle 3. Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung.

Fall	Geschwindigkeit [m/s]	Verwendete Größen
Theoretisch berechnet	3,84	$m_{Kugel} = 0,3 \text{ g}$
Gemessener Mittelwert	3,82	$d_{Kugel} = 30 \text{ mm}$
Mittlere Abweichung [%]	0,52	$\rho_{Luft} = 1,204 \text{ kg/m}^3$
		$C_{w, Kugel} = 0,47$

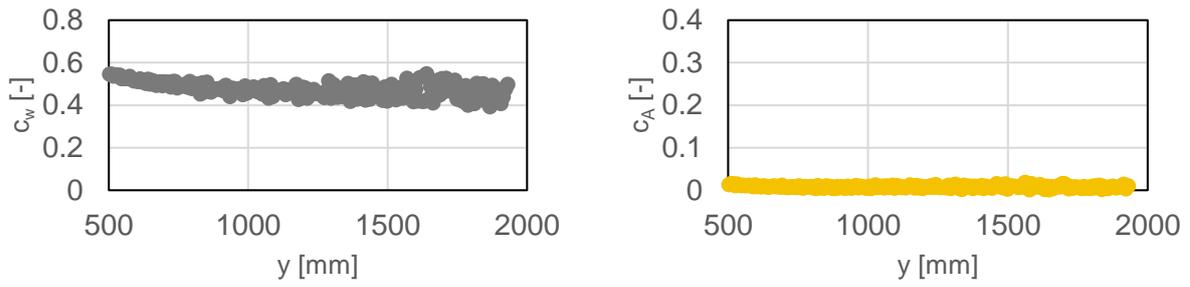


Abbildung 27. Ermittelte Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einer Kugel.

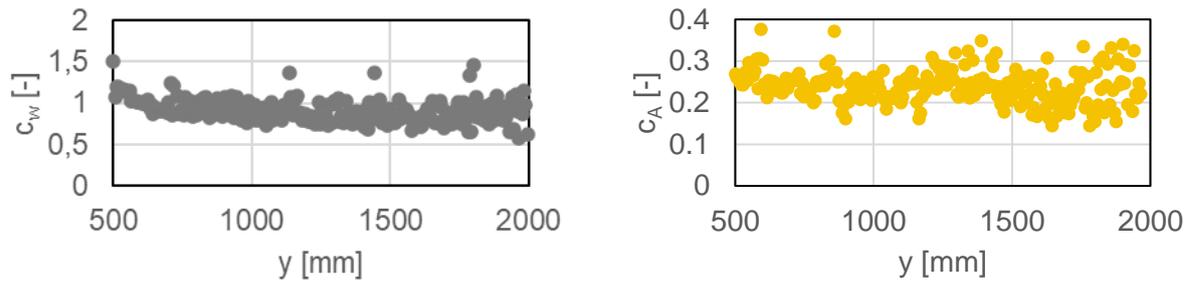


Abbildung 28. Ermittelte Widerstands- und Auftriebsbeiwerte eines Zylinders.

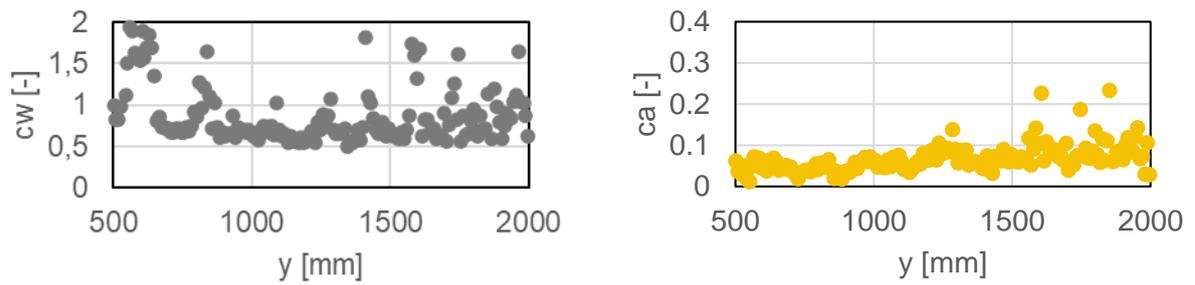


Abbildung 29. Ermittelte Widerstands- und Auftriebsbeiwerte eines Holzplättchens.

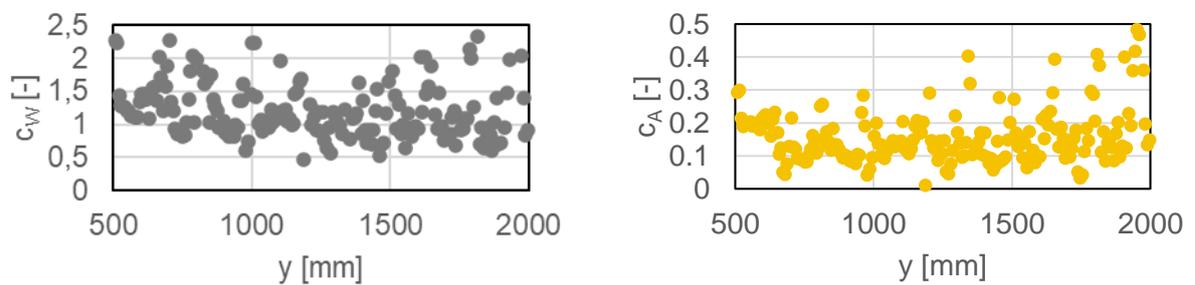


Abbildung 30. Ermittelte Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einer Kartonage.

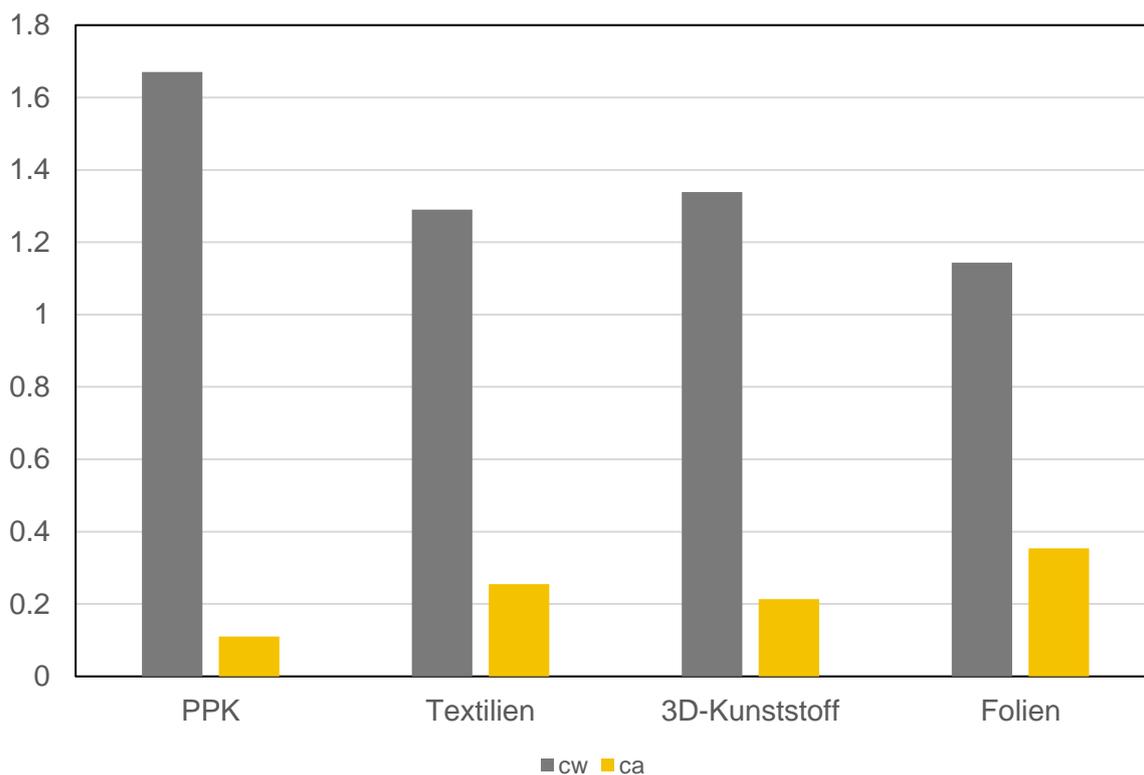


Abbildung 31. Mittelwerte der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einzelner FLUFF-Fraktionen.

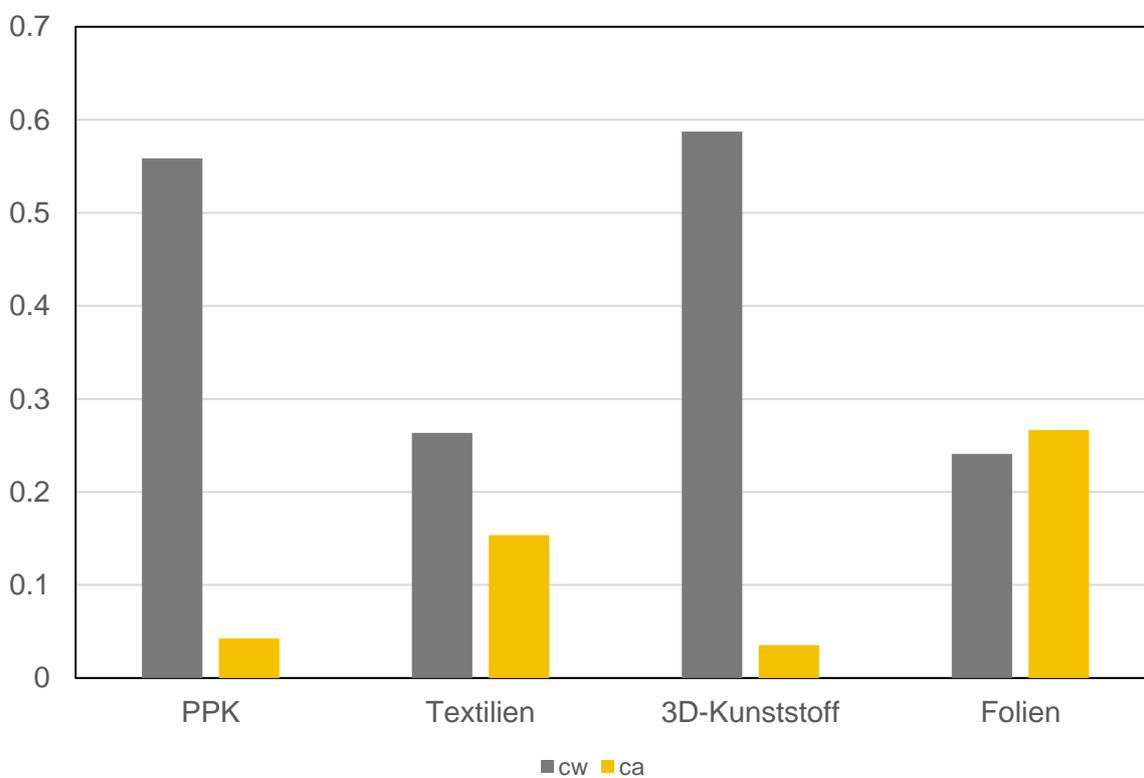


Abbildung 32. Standardabweichung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte einzelner FLUFF-Fraktionen.

Ergebnis der RFA

Bei den untersuchten Partikeln wurden folgende Hauptbegleitelemente festgestellt (siehe Tabelle 4). Elemente wie Brom, Barium, Strontium kommen bei den Kunststofffraktionen nur vereinzelt vor (so wurde Brom insgesamt nur zweimal detektiert), sodass der Einfluss dieser Elemente vernachlässigt werden kann. Auf die Darstellung der Verbund- und Rest/Feinstoffe wurde in Tabelle 5 aufgrund der fluktuierenden Zusammensetzung verzichtet.

Tabelle 4. Hauptbegleitelemente in absteigender Reihenfolge.

Folien	3D-Kunststoffe	Textilien	PPK
Calcium	Calcium	Calcium	Calcium
Titan	Titan	Chlor	Chlor
Chlor	Chlor	Kalium	Kalium
Schwefel	Schwefel	Schwefel	Silizium
Silizium	Silizium	Titan	Schwefel
Phosphor	Phosphor	Silizium	Titan
		Eisen	Eisen
		Phosphor	Phosphor

2.4 AP3: Abbrandversuche an einem Einzelpartikelreaktor (FS1, 4 PM)

Dieses Arbeitspaket diente dazu, das Abbrandverhalten (verschiedene Umsetzungsphasen) von EBS zu untersuchen. Insbesondere reststoff- bzw. restkoks bildende Kunststofffraktionen wurden hierbei näher analysiert. Zusätzlich wurde das Verformungs- und Erweichungsverhalten von in EBS enthaltenen Kunststoffen analysiert werden.

Durchgeführte Arbeiten

Durch zwei Einzelpartikelreaktoren (einer zur Untersuchung des Abbrandverhaltens und ein anderer zur Untersuchung des Verformungs- und Erweichungsverhaltens) wurde mit Hilfe von Kameraaufnahmen das Verhalten von FLUFF-Partikeln unter verschiedenen Gasatmosphären bei hohen Temperaturen untersucht.

Untersuchung des Abbrandverhaltens

Zur Untersuchung des Abbrandverhaltens stand ein Einzelpartikelreaktor zur Verfügung (siehe Abbildung 33).

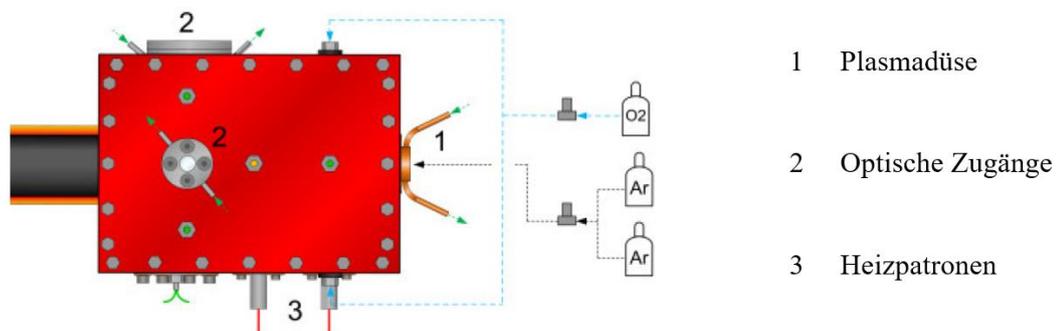


Abbildung 33. Draufsicht auf den Einzelpartikelreaktor nach [1].

Vor der Versuchsdurchführung wurde der mit hitzebeständigem Beton ausgekleidete Reaktor zur Vermeidung von thermisch induzierten Spannungsrissen durch Heizpatronen kontinuierlich erwärmt. Danach wurde über eine mit Argon gespeiste Plasmadüse Heißgas erzeugt. Die Plasmadüse ist orthogonal zu zwei, an den optischen Zugängen montierten Kameras positioniert. Die Komponenten des Reaktors sind durch einen Wasserkreislauf (symbolisiert durch die grünen Pfeile in Abbildung 33) vor thermischen Schäden gesichert. Bei Erreichen der Gas-Solltemperatur wurde eine definierte Sauerstoffatmosphäre eingestellt und die Temperatur entsprechend nachreguliert. Anschließend begann die Versuchsdurchführung, dabei wurden einzelne Partikel durch einen Stößel schlagartig von unten in den Reaktor eingeführt. Mit den beiden Kameras wurden die Veränderungen der Partikel beobachtet und als Bildfolgen aufgezeichnet. Hierbei wurden charakteristische (Abbrand-)phasen deutlich, die sich unterschieden, je nachdem, ob eine synthetische (Folien, 3D-Kunststoffe) oder biogene Fraktion (Textilien, PPK) vorlag. Im Vergleich zu biogenen Partikeln sind Kunststoffe in der Lage zu schmelzen. Es existieren jedoch auch Kunststoffe, die über eine Reststoffbildung und einen nachfolgenden Koksausbrand verfügen. Zur Charakterisierung der Zeiten verschiedener Umwandlungsphasen unterschiedlicher Fraktion dienten die Kriterien nach Tabelle 6.

Es wurden Versuche bei 900 °C, 1000 °C, 1100 °C und 1200 °C Partikelkammertemperatur und einem Sauerstoffgehalt von 9 Vol. % durchgeführt. Temperaturen von 1300 °C waren nicht realisierbar. Bei dem Versuch 1300 °C in der Partikelkammer einzustellen, stieg die Temperatur vor der Plasmadüse auf über 1700 °C an und führte zum Abschmelzen des Thermoelements Typ S. Die untersuchten EBS-Proben sind unter „Ergebnisse der Abbrandversuche“ beschrieben.

Tabelle 6. Spezifische Umwandlungsphasen bei synthetischen und biogenen Fraktionen.

Abbrandzeiten synthetischer Partikel [s]	Abbrandzeiten biogener Partikel [s]
Zündverzugszeit	Zündverzugszeit
Verformung	Pyrolyse: Zeit bis zum Verlöschen der Gasflamme
Schmelzen	
Verlöschen der Gasflamme (Ende Pyrolyse)	
(Koksausbrand)	Koksausbrand

Die Hochtemperaturversuche bei >1000 °C sind eine Erweiterung zu den bisherig durchgeführten Versuchen, die bei maximal 1000 °C stattgefunden haben.

Untersuchung restkoksbildender Mechanismen bei Kunststoffen

Zur Untersuchung der restkoksbildenden Mechanismen bei den synthetischen Fraktionen wurde die Ergebnisse der RFA-Messungen mit den Untersuchungen im Einzelpartikelreaktor (siehe Abbildung 33) kombiniert, um Korrelationen zwischen elementarer Zusammensetzung und Restkoksbildung bei Kunststoffen zu bilden. Zudem wurden ebenso Zusammenhänge zwischen Einfärbung der Partikel und Restkoksbildung untersucht. Hierzu wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt:

- Versuchsreihe 1: Sortenreine Kunststoffe
Für die erste Versuchsreihe wurden sortenreine Kunststoffe Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Polyoxymethylene (POM), Polyamide (PA), Polyvinylchlorid (PVC) und Polypropylen (PP), jeweils ungefärbt und schwarz eingefärbt eingesetzt. Die Kunststoffe wurden als Stäbe besorgt und mittels eines Rohrschneiders in etwa gleich große Zylinder geschnitten. Anschließend wurden die Partikel durch einen Seitenschneider alle auf die gleiche Masse (0,36 Gramm) gebracht, damit diese als

Einflussfaktor für ein unterschiedliches Abbrandverhalten wegfällt. Danach sind die Partikel einer RFA unterzogen worden. Zum Schluss wurden die Kunststoffe bei etwa 1000 °C im Reaktor verbrannt.

- **Versuchsreihe 2: Schwarz, viel Ti/Ca/Cl**
In der zweiten Versuchsreihe wurden FLUFF-Partikel verbrannt. Überprüft wurden Partikel mit schwarzer Einfärbung (Einfärbung in der Regel durch Schwarzpigment Ruß), viel Titan, viel Calcium oder sehr viel Chlor. Um Partikel mit diesen Kriterien auffindig zu machen, wurde in der am LEAT vorhandenen EBS-Datenbank (die im Rahmen des Projektes u.a. um RFA-Spektren ergänzt wurde) nach typischen Spektren gesucht und anhand der Partikelnummer, die Proben aus dem LEAT-EBS-Rückstelllager genommen. Diese wurden dann wieder auf die gleiche Masse gebracht, wobei für 3D-Kunststoffe (0,4 Gramm) und für Folien (0,04 Gramm), aufgrund der grundsätzlich leichteren Folien, unterschiedliche Massen gewählt wurden. Insgesamt wurden 40 Partikel bei 1000 °C Reaktortemperatur verbrannt. Davon waren 18 Partikel schwarz, 10 Partikel enthielten sehr viel Chlor, 10 Partikel viel Titan und 6 Partikel viel Calcium. Die schwarzen Partikel und die Partikel mit viel Calcium überschneiden sich in 3 Proben, außerdem ist eine Probe schwarz und weist gleichzeitig einen hohen Chlorgehalt auf. Diese „Kriterien-Hybride“ wurden zur Vollständigkeit dennoch mitverbrannt.
- **Versuchsreihe 3: Folien mit viel Ti/Ca**
In der dritten Versuchsreihe wurden auf Grundlage der vorherigen Versuchsreihe weitere 10 Folien mit viel Titan und 10 Folien mit viel Calcium verbrannt. Diese 20 Partikel wurden nach derselben Vorgehensweise wie bei der zweiten Versuchsreihe aus dem EBS-Rückstelllager entnommen und auf die gleiche Masse gebracht. Aufgrund von teilweise sehr leichten Folien wurde die Masse allerdings auf 0,02 Gramm festgelegt. Die Verbrennung der Partikel erfolgte bei 950 °C.

Untersuchung des Verformungs- und Schmelzverhaltens von Kunststoffen

Bisherige Untersuchungen haben nicht das Erweichungsverhalten von in EBS enthaltenen unterschiedlichen Kunststoffen berücksichtigt. Um dies zu ermöglichen, sollte der Einzelpartikelreaktor in Abbildung 33 in einem anderen (nicht-oxidierenden) Modus betrieben werden, sodass die Partikel in einem inerten Gasstrom mit einer Aufheizrate von ca. 2 K/min erwärmt werden. Dies ließ sich mit dem Einzelpartikelreaktor nicht wie geplant realisieren, sodass hierfür ein zweiter Einzelpartikelreaktor verwendet wurde. Dieser Reaktor wird über einen konventionellen elektrischen Gaserhitzer mit einer Stickstoffatmosphäre versorgt (5 K / min und Temperaturen von über 400 °C). Die Proben befinden sich bereits zu Beginn des Erwärmungsprozesses auf einem in den Reaktor hängenden Probenteller (siehe Abbildung 34). Mittels Wärmebildkamera wird der Verformungs- und Schmelzvorgang beobachtet und ein Mittelwert der Verformungs- und Schmelztemperatur bestimmt. Die ermittelten Verformungs- und Schmelztemperaturen dienen als weitere Eingangsgrößen der Simulation, in der bisher mit der Schmelztemperatur von reinem PE gerechnet wurde. In diesem Zusammenhang sind auch Zuschlagstoffe in den Kunststoffen, die direkten Einfluss auf die mechanische und thermische Stabilität der Partikel haben, von Bedeutung. Mit der üblichen Brennstoff-Elementaranalyse lassen sich die dafür eingesetzten Elemente (u.a. Ca, Ti, ...) nicht bestimmen. Vor den Einzelpartikelreaktorversuchen werden Röntgenfluoreszenzanalysen durchgeführt, um daraus

ggf. Rückschlüsse auf das Verhalten der Partikel im Reaktor zu ermöglichen. Die untersuchten Kunststoff-Proben sind unter „Ergebnis der Analyse restkoksbildender Mechanismen bei Kunststoffe“ beschrieben.

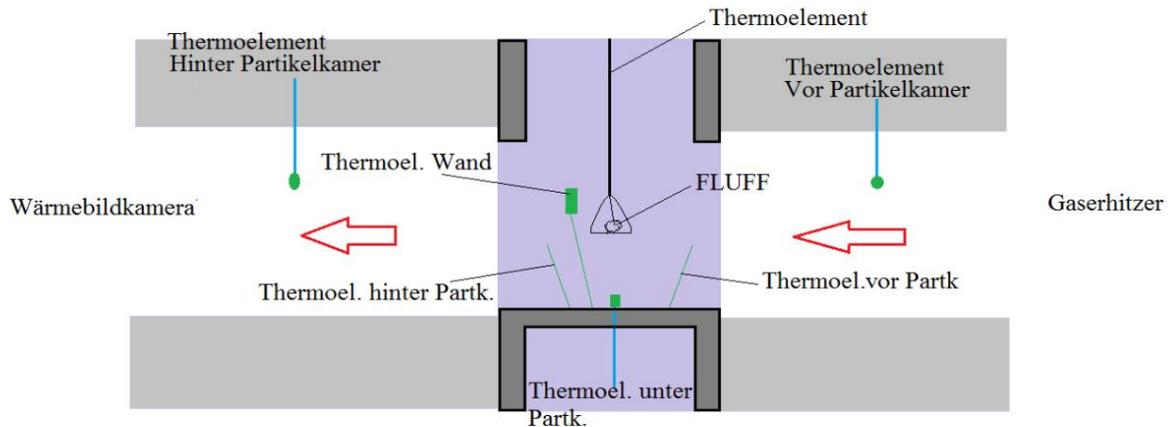


Abbildung 34. Querschnitt des Einzelpartikelreaktors (Verformungs- und Schmelzverhalten).

Bei der ersten Versuchsreihe, die (aufgrund der schmelzbaren Isolierung der Thermoelemente) bei maximal 350 °C durchgeführt wurde, wurden viele Partikel nicht zum vollständigen Aufschmelzen gebracht. Aus diesem Grund wurde der Reaktor nach der ersten Versuchsreihe umgebaut und alle im Reaktor befindlichen Thermoelemente wurden ausgetauscht.

Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde das Verrennungsverhalten von FLUFF-Partikeln bei Temperaturen >1000 °C untersucht. Insbesondere die im FLUFF erhaltenen Kunststoffe, die mit 40 % als Hauptbestandteil in FLUFF vertreten sind, wurden intensiv erforscht. Hierbei wurden entscheidende Erkenntnisse bezüglich restkoksbildender Mechanismen und über das Verformungs- und Erweichungsverhalten erlangt.

Ergebnisse der Abbrandversuche

Insgesamt wurden 300 Partikel verbrannt, darunter 113 Kunststoffpartikel. Dabei wurden die Partikel einer RFA unterzogen und das Gewicht der Partikel wurde bestimmt. Das durchschnittliche Gewicht der Partikel ist in Abbildung 35 dargestellt, hinsichtlich der RFA wurden die gleichen Elemente wie in Kapitel 2.3 beschrieben detektiert. Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen die Umsetzungszeiten von 3D-Kunststoffen bei 1000 °C Partikelkammertemperatur und 9 Vol. % O₂. Durch eine starke Gasflammenbildung bzw. stark rußende Flammen ist das Bestimmen von Verformungs- und Schmelzdauer teilweise nicht möglich, da die Flamme das gesamte Partikel verhüllt. Wie erwartet nehmen Pyrolysedauer und Gesamtumsetzungszeit mit steigendem Gewicht durchschnittlich zu (siehe Ausgleichsgeraden in Abbildung 38). In Abbildung 39 und Abbildung 40 sind exemplarisch die Umsetzungszeiten für die PPK Fraktion bei 1000 °C Partikelkammertemperatur und 9 Vol. % O₂ dargestellt. Wie zu erwarten, steigen die Umsetzungszeiten im Durchschnitt mit wachsender Masse. Bei der PPK-Fraktion, wie bei den Textilien setzt der Restkoksabbrand unmittelbar nach Einschub des Partikels ein und verläuft parallel zur Gasflamme. Dies erklärt, warum zwischen Restkoksabbrand und Gesamtumsetzungsdauer nahezu kein Unterschied feststellbar ist (siehe Abbildung 40).

Insgesamt fällt die durchschnittliche Umsetzungsdauer bei den biogenen Fraktionen länger aus als bei den synthetischen (siehe Abbildung 41). Dies liegt daran, dass PPK und Textilien, im Gegensatz zu 3D-Kunststoffen und Folien, immer über Restkoksabbrand verfügen. Dennoch benötigen die 3D-Kunststoffe vergleichsweise lange, um sich vollständig umzusetzen, was durch ihre größere Masse und die dadurch längeren Aufheizzeiten begründet ist. Abbildung 42 zeigt die durchschnittlichen Umsetzungszeiten der 3D-Kunststoff-Fraktion bei verschiedenen Temperaturen. Interessanterweise ist die Gesamtumsetzungsdauer bei 1200 °C am größten. Dies liegt insbesondere an der längeren Dauer des Koksabbrands und zeigt die Relevanz auf koks bildende Kunststofffraktionen näher zu untersuchen. Insgesamt sind von den 113 verbrannten Kunststoffpartikeln 50 % reststoff- bzw. restkoks bildend. Daher wurden weitere Versuchsreihen zur Analyse der Restkoksbildung bei Kunststoffen durchgeführt.

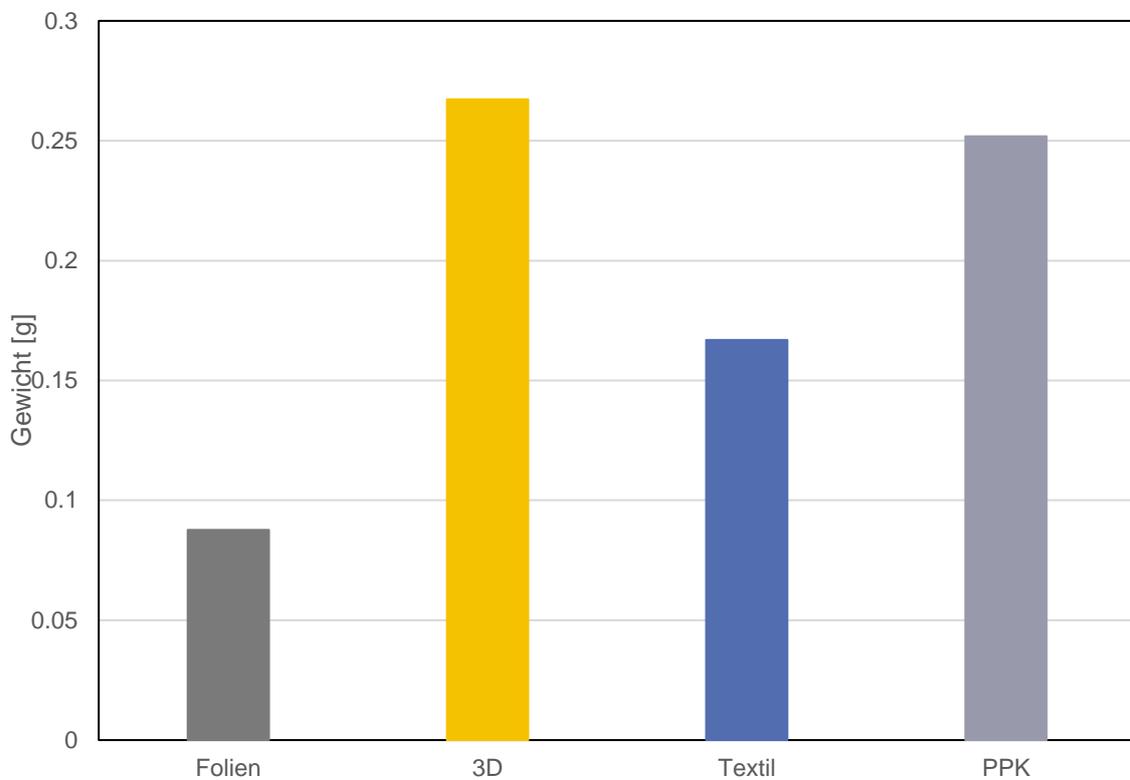


Abbildung 35. Durchschnittliche Masse verschiedener Fraktionen.

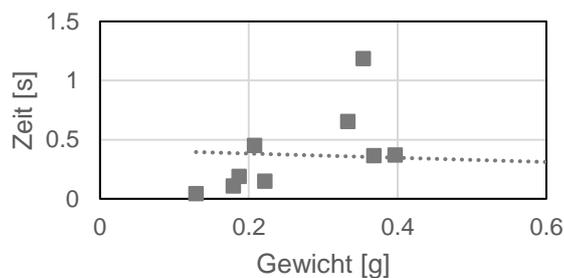


Abbildung 36. Zündverzugszeit, 3D-Kunststoff 1000 °C und 9 Vol. % O₂.

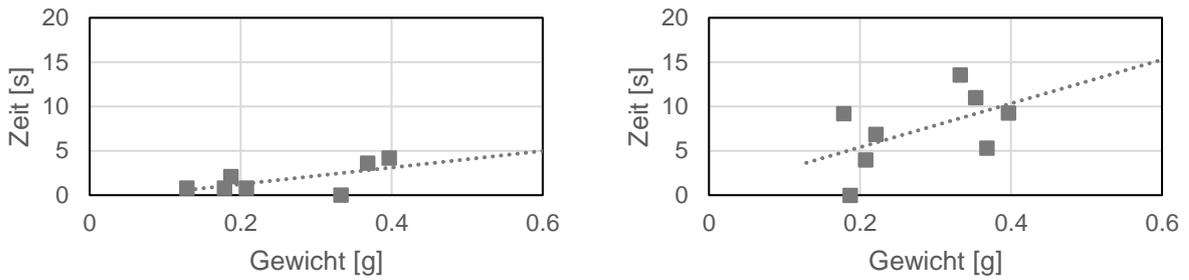


Abbildung 37. Verformungs- (links) und Schmelzdauer (rechts), 3D-Kunststoff 1000 °C und 9 Vol. % O₂.

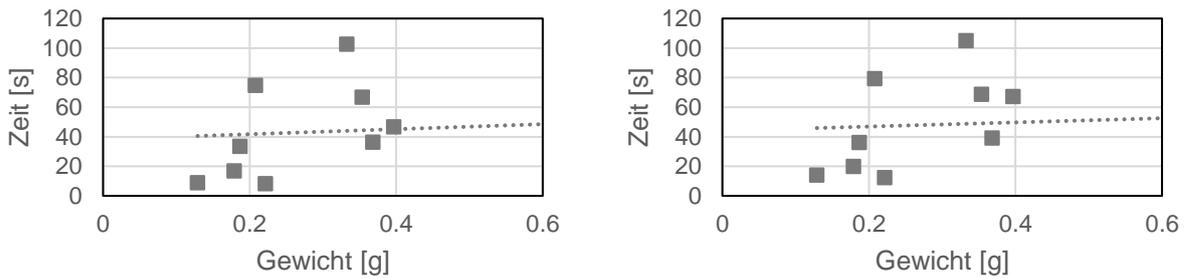


Abbildung 38. Pyrolyse- (links) und Gesamtumsetzungsdauer (rechts), 3D-Kunststoff 1000 °C und 9 Vol. % O₂.

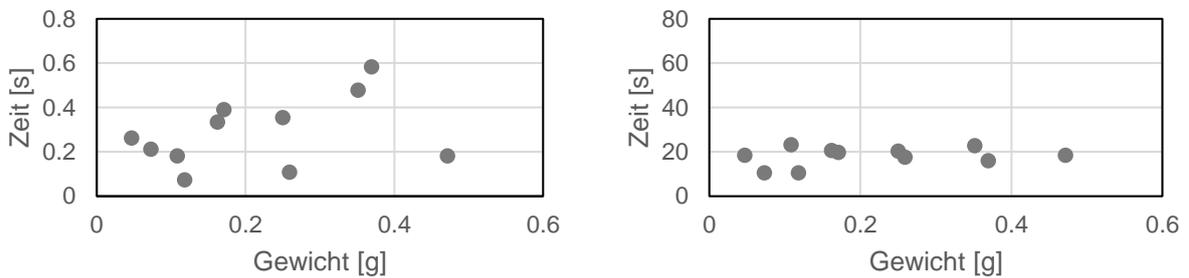


Abbildung 39. Zündverzugszeit (links) und Pyrolysedauer (rechts), PPK 1000 °C und 9 Vol. % O₂.

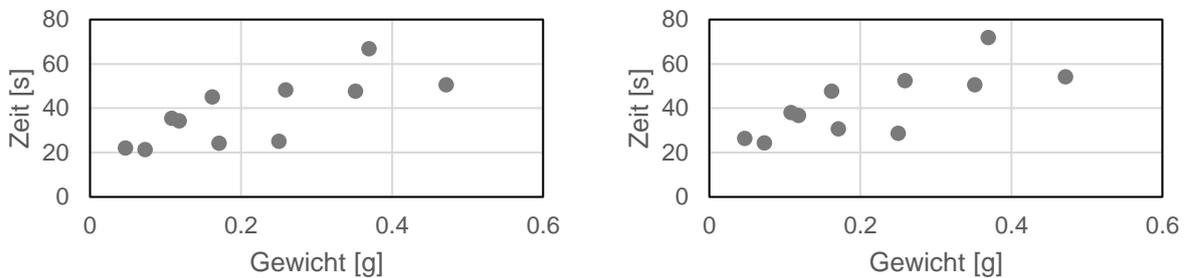


Abbildung 40. Dauer Restkoksabbrand (links) und Gesamtumsetzungsdauer (rechts), PPK 1000 °C und 9 Vol. % O₂.

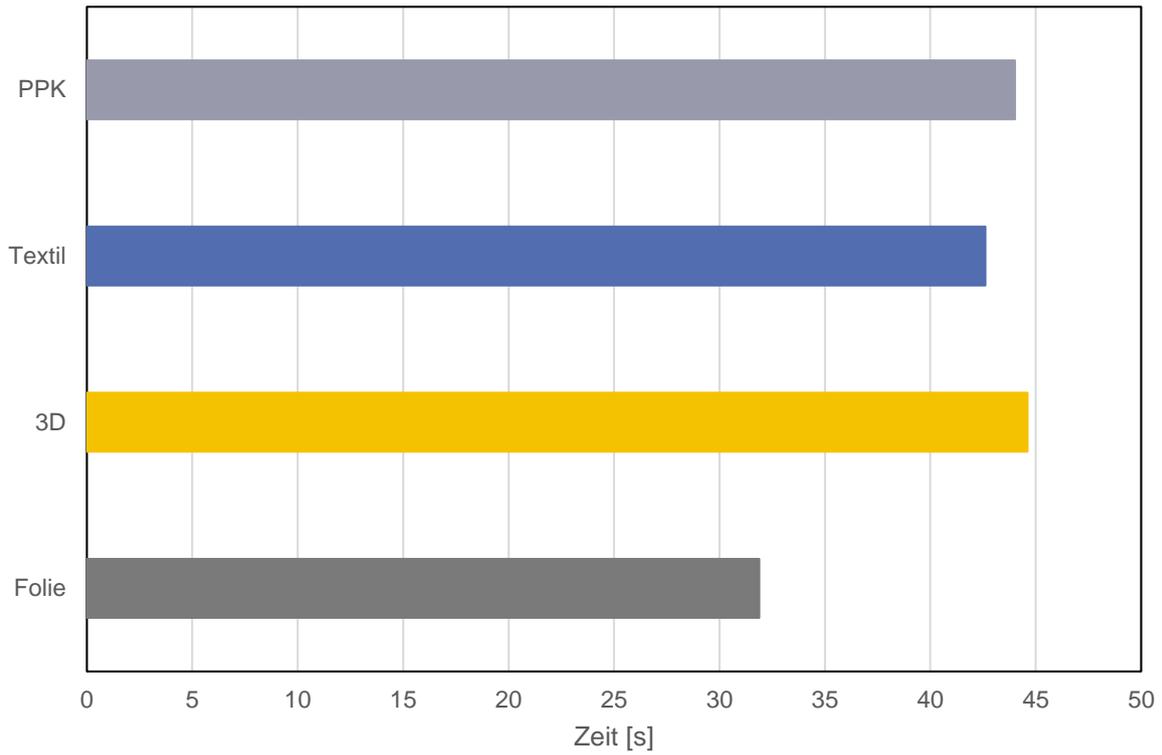


Abbildung 41. Durchschnittliche Gesamtumsetzungsdauer, Temperaturen gemittelt und 9 Vol. % O₂.

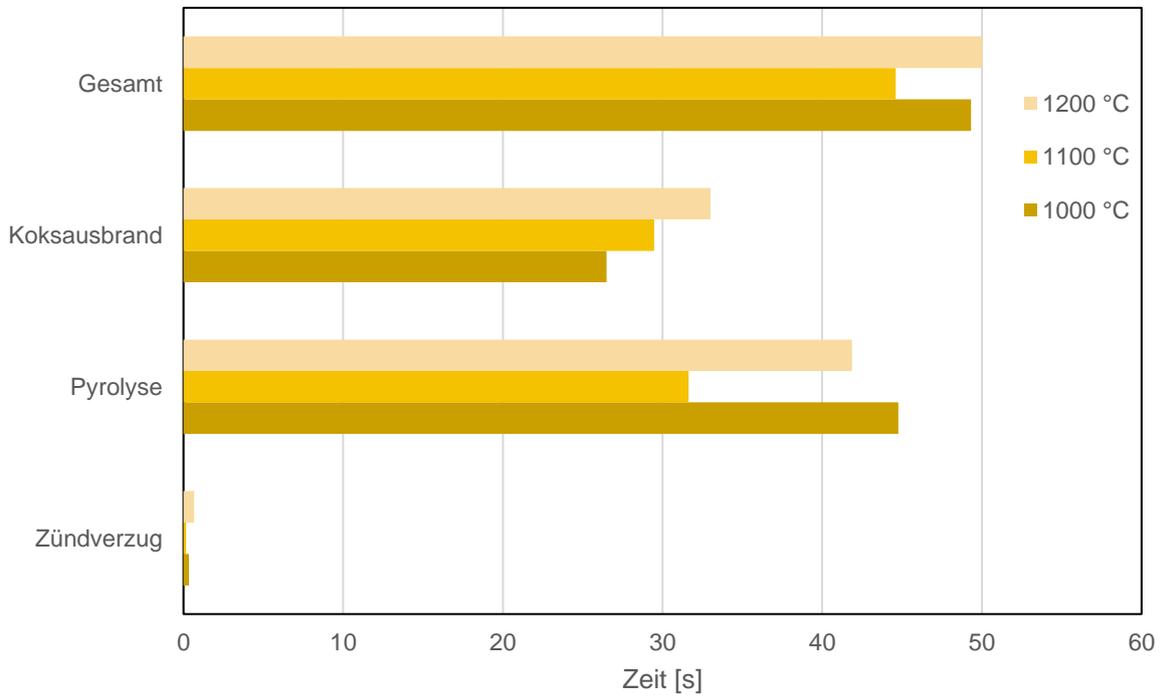


Abbildung 42. Durchschnittliche Umsetzungsdauern, 3D-Kunststoffe bei verschiedenen Temperaturen und 9 Vol. % O₂.

Ergebnis der Analyse restkoksbildender Mechanismen bei Kunststoffen

Zusätzlich zu den 113 bereits untersuchten Kunststoffpartikeln wurden weitere 72 Kunststoffpartikel im EPR verbrannt, um diese auf Restkoksabbrand zu analysieren. Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt bei der sortenreine, schwarz eingefärbte und Kunststoffe mit hohem Chlor, Calcium oder Titangehalt untersucht wurden. Nachfolgend sind die Ergebnisse aus den Versuchsreihen aufgelistet:

- **Versuchsreihe 1: Sortenreine Kunststoffe**

In dieser Versuchsreihe wiesen 4 von 5 schwarzen Partikel und alle PET- und PVC-Partikel eine Restkoksabbrandphase auf (PA nicht). Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass schwarze Kunststoffe eine Tendenz zur Verkohlung aufweisen. PE, POM und PP haben in Reinform keinen Restkoksabbrand, PA besaß dabei in beiden Formen keinen Koksabbrand. Abbildung 43 zeigt die Unterschiede im Abbrandverhalten zwischen PE-rein und PE-schwarz auf. Zu sehen sind das Thermoelement der Partikelkammer sowie der Tiegel mit verbrennender PE-Probe aus der Draufsicht.

PE-rein schmilzt vollständig auf, es ist kein Restkoksabbrand erkennbar. PE-schwarz hingegen schmilzt nicht vollständig auf und zeigt Restkoksabbrand (Aufglühen der Partikeloberfläche) sowie eine stark rußende Flamme.

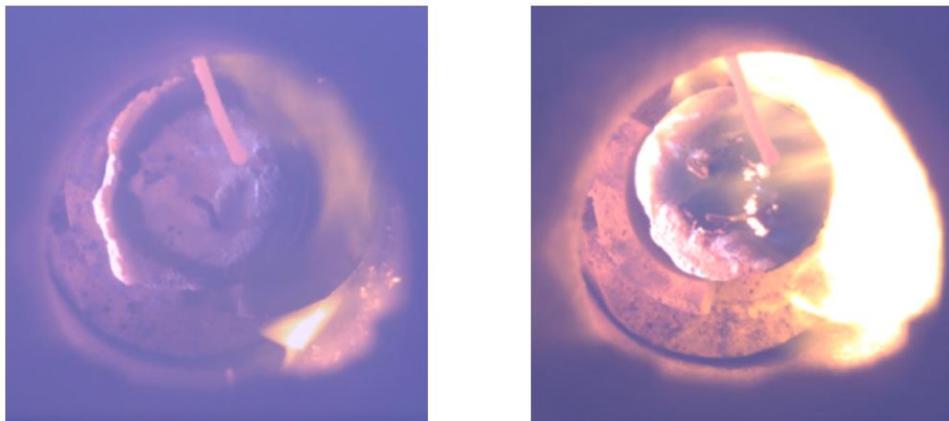


Abbildung 43. Vergleich des Abbrandverhaltens von PE-rein ohne Koksabbrand (links) und PE-schwarz mit Koksabbrand (rechts).

- **Versuchsreihe 2: Schwarz, viel Ti/Ca/Cl**

Die Auswertung dieser Versuchsreihe zeigt, dass 16 von 18 schwarzen Partikel Koksabbrand zeigen. Alle Partikel (10/10) mit einem hohen Chlorgehalt zeigen eine Restkoksabbrandphase. Folien mit viel Titan (3/3, kleine Stichprobe) bilden Rückstände, die sich allerdings vom klassischen Restkoksabbrand durch Partikel mit hohem Chlorgehalt unterscheiden. Aus diesen Ergebnissen wird die Theorie, dass schwarze Partikel zum Koksabbrand neigen, anhand der FLUFF-Partikel bestätigt. Bei den Partikeln mit sehr viel Chlor handelt es sich sehr wahrscheinlich um PVC und deshalb bilden auch hier alle Partikel Restkoks. Außerdem ist aufgefallen, dass speziell Folien mit viel Titan Reststoffbildung zeigen, was allerdings auf einer sehr kleinen Stichprobe von 3 Partikeln basiert. Deshalb wird die Theorie in der dritten Versuchsreihe noch einmal mit mehr Partikeln überprüft. Abbildung 44 zeigt einen Vergleich einiger überprüfter Partikel.

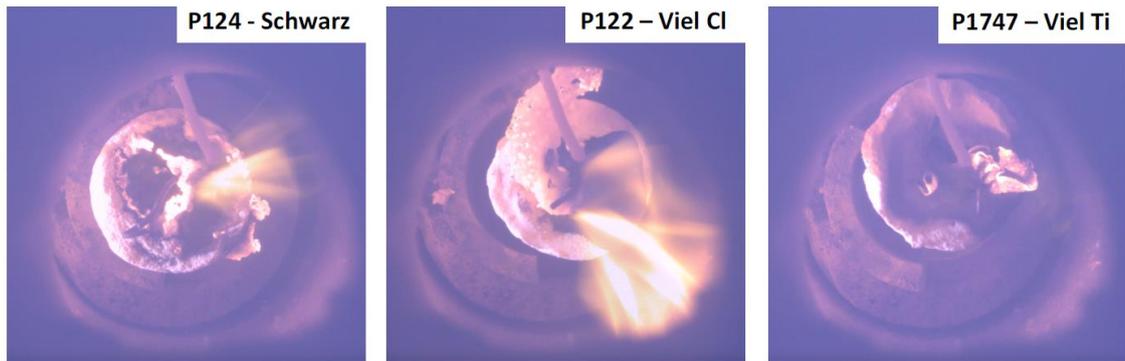


Abbildung 44. Restkoksbildung von schwarzen Partikeln (links), Partikeln mit viel Chlor (Mitte) und Folien mit viel Titan (rechts).

- Versuchsreihe 3: Folien mit viel Ti/Ca
Die Auswertung dieser Versuchsreihe ergab, dass alle Partikel nicht deutlich geschmolzen sind und einen Rest gebildet haben. Der nachfolgende „Restkoksabbrand“ ist nicht so ausgeprägt und ist auch nicht von einer porösen Partikelgeometrie gekennzeichnet wie es z. B. bei PVC der Fall war. Es handelt sich vielmehr um ein Nachglühen (Verdampfen/Sublimation) der Asche. Der Unterschied ist in Abbildung 45 dargestellt. Hier sind weitere Versuchsreihen nötig, um die Mechanismen der Reststoffbildung bei Partikeln mit viel Ti/Ca gänzlich zu klären.

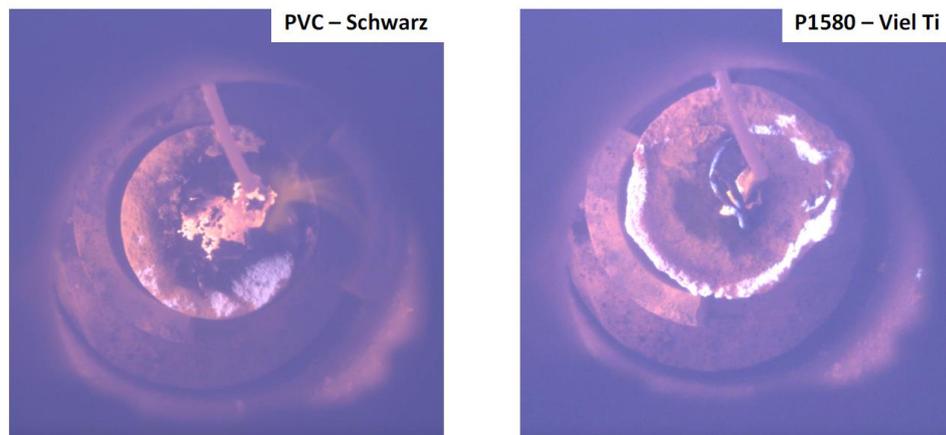


Abbildung 45. Vergleich des Restkoks von PVC (links) mit dem Restkoks von Folien mit viel Titan (rechts) oder viel Calcium.

Zusammengefasst zeigen alle PVC- und PET-Kunststoffe Reststoffbildung mit anschließendem Restkoksabbrand. Dabei ist der Verkohlungsprozess nach [11] [12] ein Zusammenspiel aus Dehydrierung, Vernetzung und Aromatisierung. Unter Wärmeeinwirkung sind diese Mechanismen vor allem bei Kunststoffen mit einer hohen Anzahl von Aromaten, Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen und durchgängigen Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen in der Hauptkette sowie stark vernetzten Polymeren anzutreffen. Eine Restkoksabbrand hängt somit vorrangig von der chemischen Struktur des Polymers ab.

Zudem bilden schwarz eingefärbte Kunststoffe überwiegend Restkoks, was an dem Schwarzpigment Ruß liegt. Die Mechanismen zur „Restkoks“ Bildung bei Partikeln mit hohem Titan und Calcium Gehalt sind nicht geklärt. Dazu wären weitere Versuchsreihen mit Kunststoffen definierter Zusammensetzung nötig.

Ergebnis der Untersuchung des Verformungs- und Schmelzverhaltens von Kunststoffen

Insgesamt wurden 86 Kunststoffpartikel aus realem FLUFF untersucht. Dabei wurden drei verschiedene Erweichungsphasen charakterisiert (siehe Abbildung 46). In den Bildern sind Wärmestrahlung des Gaserhitzers (rot) und das jeweilige FLUFF-Partikel (Vordergrund) zu erkennen. Dieses wurde an einem Thermoelement befestigt und über einer Schale gehängt. Letztere diente dazu, die Schmelze des Partikels aufzunehmen, sodass diese nicht in den Reaktor tropft.

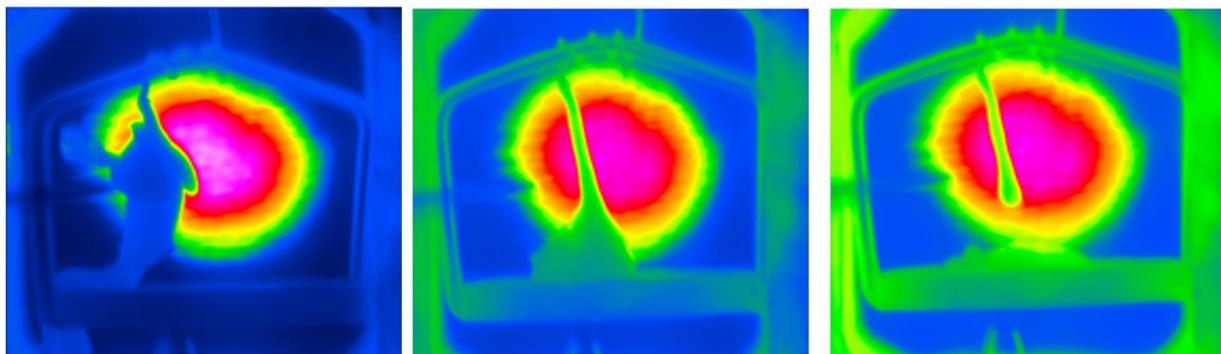


Abbildung 46. Unterschiedliche Erweichungsphasen, von links nach rechts: Verformung, Schmelzen, Zersetzung in flüssige Phase.

Die Verformungstemperatur wurde bei der ersten thermisch induzierten Verformung der Partikel aufgenommen. Die Schmelztemperatur wurde während der Phase, in der sich die Kunststoffpartikel zu einer Kugel verformt haben, notiert. Aus der Literatur [13] [14] geht hervor, dass die Kunststoffpartikel während der Schmelzphase ihre ursprüngliche Form verlieren und in einen viskosen Zustand übergehen, die Makromoleküle dabei aber noch zusammenhängen. Die Zersetzungstemperatur ist damit noch nicht erreicht. Bei weiter steigenden Temperaturen verlieren die Makromolekülketten ihren Zusammenhang und es kommt zum Kettenzerfall und das Polymer fließt auseinander. Die Bestimmung der Zersetzungstemperatur erfolgte während der Phase, in der die gebildete Kugel sich vom Thermoelement löste und nach unten in den Probenteller fiel. Ab diesem Punkt wurde davon ausgegangen, dass das Polymer komplett in die flüssige Phase übergegangen ist.

Für die Auswertung der Versuche wurden die durch die RFA bestimmten Spektren herangezogen, aber auf die Elemente Calcium und Titan beschränkt. Diese Anteile kommen in dieser Reihenfolge am häufigsten in Polymeren vor. Die Auswertung aller Versuche ergibt, dass die Partikel mit einem hohen Calciumgehalt die höchste Verformungs- und Schmelztemperatur aufweisen (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5. Durchschnittliche Erweichungstemperaturen von Kunststoffen mit Calcium und Titan RFA-Hauptpeak.

Kunststoffe: RFA-Hauptpeak bei Additiv	Verformungstemperatur [°C]	Schmelztemperatur [°C]	Zersetzungstemperatur [°C]
Calcium	148	219	360
Titan	137	217	338

Im Vergleich zur Schmelztemperatur von reinem PE von 127 °C fallen die ermittelten Schmelztemperaturen höher aus. Um die Funktionsfähigkeit des Reaktors und der Auswertemethodik zu überprüfen, wurden ferner Versuche mit sortenreinen Kunststoffen durchgeführt. Tabelle 6 zeigt die dabei ermittelten und in der Literatur zu findenden Schmelztemperaturen für die Kunststoffsorten POM und PET.

Tabelle 6. Durchschnittliche Erweichungstemperaturen von Kunststoffen mit Calcium und Titan Hauptpeak.

Kunststoff	Schmelztemperatur (Literatur [13]) [°C]	Schmelztemperatur (Experiment) [°C]
POM	180	182,32
PET	260	262,04

Die ermittelten Temperaturen stimmen mit den Literaturangaben überein. Der Grund für die Verschiebung des Schmelzpunktes hin zu höheren Temperaturen bei industriell produzierten Kunststoffen, im Vergleich zu sortenreinen Material, ist auf das Element Calcium zurückzuführen bzw. das üblicherweise zugegebene Mineral Calciumcarbonat. Dies ist mit Abstand der am häufigsten eingesetzte Begleitstoff und auch bei Kunststoffen mit einem RFA-Hauptpeak bei Titan (welches in Form von Titandioxid als weißes Farbpigment dient) im hohen Maße vertreten. Es wird den Kunststoffen als Füllstoff (teilweise bis zu 40 %) hinzugefügt und soll als Füllmaterial die Herstellungskosten reduzieren. Dadurch werden allerdings die Eigenschaften des Polymers verändert. Die Wärmebeständigkeit wird nach oben gesetzt. Der Grund dafür ist, dass mit dem eingebrachten Calciumcarbonat Kristallisationskeime bestehen, an denen der im flüssigen Zustand produzierte Kunststoff kristallisieren kann. Die erstarrten Polymere wickeln sich um das eingebrachte Calciumcarbonat, wodurch nicht nur die Isotropie, sondern auch die Festigkeit und letztendlich die Wärmebeständigkeit des Kunststoffes erhöht wird.

2.5 AP4: Erweiterung und Überprüfung der Flug- und Abbrandmodelle (FS1, 3 PM)

Zur Modellierung des Flugverhaltens werden Translations- und Drehimpulsgleichungen für die Partikel gelöst. Wenn die Kunststoffpartikel bei der Erwärmung ihre Form ändern, was im Konversionsmodell berücksichtigt wird, wird der Luftwiderstandsbeiwert aus einer angepassten Korrelation von Hölzer & Sommerfeld [15] bestimmt. Bei den Konversionsmodellen wird zwischen restkoksbildenden (biogenen) und nicht-restkoksbildenden (Kunststoffe) Materialien unterschieden. Die detaillierte Beschreibung der gewählten Modellansätze sind auf <http://www.lead.ruhr-uni-bochum.de/index.php?do=Forschung/Projekte/IGF20410N.htm> zum Download verfügbar. Weiterführende Zusatzinformationen sind in [1] zu finden. Tabelle 7 zeigt den Modellierungsansatz für die biogenen und synthetischen Fraktionen. Für alle Fraktionen, mit Ausnahme des Feinanteils, wird ein mehrschaliges Modell zur Beschreibung der in das Partikel eindringenden Temperatur-/Reaktionsfront gewählt.

Wenn eine Schale 100 °C erreicht, setzt die Trocknung ein. Der Einfachheit halber wird die Verdunstung von Wasser unterhalb des Siedepunkts vernachlässigt. Bei nicht restkoksbildenden Materialien wird davon ausgegangen, dass nur Oberflächenfeuchtigkeit vorhanden ist. In Analogie zur Trocknungsfrent wird eine Pyrolysefront eingeführt. Sobald die Schalentemperatur die (vordefinierte) Entgasungstemperatur erreicht, werden flüchtige Stoffe freigesetzt. Die Partikelmasse nimmt ab, während das Volumen der Partikel als konstant angenommen wird. Für

die Pyrolyse wurde ein Standardansatz nach Arrhenius verwendet. Die flüchtigen Bestandteile werden als Pseudospezies dargestellt, die aus der Immediat- und Elementaranalyse abgeleitet wurde [1]. Die heterogene Umwandlung des Restkokes wird unter Bezugnahme auf bekannte, aus der Kohleverbrennung abgeleitete Modelle mit einem kinetischen/diffusionsbegrenzten Ansatz [16] [17] modelliert, wobei davon ausgegangen wird, dass Kohlenstoff aufgrund der relativ großen Größe der FLUFF-Partikel zu CO₂ oxidiert wird (wobei die CO-Bildung vernachlässigt wird) [1]. Für nicht restkoksbildende Fraktionen wird das Schmelz- und Zersetzungsverhalten nach einem Ansatz von Bluhm-Drenhaus [18] modelliert. Wenn das Schmelzen fortschreitet, ändert sich die Partikelform zu einer Kugel. Die Zersetzungskinetik basiert auf einem Vorschlag von Bockhorn et al. [19] für Polyethylen.

Tabelle 7. Verwendeter Modellierungsansatz.

Umwandlungsprozess	Restkoksbildende Fraktionen (biogenen Stoffe)	Nicht restkoksbildende Fraktionen (Kunststoffe)
1.	Partikelauflösung	Partikelauflösung
2.	Trocknung (Innere Partikel-trocknung)	Trocknung (Oberflächentrocknung)
3.	Pyrolyse (konstante Partikelform)	Schmelzen (Änderung der Partikelform)
4.	Restkokverbrennung	Zersetzung

Alle Simulationen wurden mit ANSYS Fluent durchgeführt. Zur Beschreibung der Bewegung der Partikel wurde das Discrete Phase Model (DPM) verwendet. Turbulenz wurde mit dem k-ε Turbulenzmodell und Wärmestrahlung mit dem Discrete Ordinates Modell (DO) abgebildet. Für die Gasumwandlung wurde das Eddy-Dissipation-Modell verwendet.

Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurden die bestehenden Simulationsmodelle um die aktualisierten Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte ergänzt. Zusätzlich wurde die neu ermittelte Schmelztemperatur für Kunststoffe den Modellen hinzugefügt. Um die Gültigkeit der Simulationsmodelle zu überprüfen wurden die in AP2 durchgeführten Fallschachtversuche mit Modellpartikeln nachsimuliert, um einen präzisen Vergleich zwischen experimentell und simulativ ermittelter Fallgeschwindigkeit abzubilden.

Erzielte Ergebnisse

Abbildung 47 zeigt die Simulationsdomäne des Fallschachtes sowie die Trajektorie einer Styroporkugel. Die simulierte Fallgeschwindigkeit weicht um 10.5 % von der experimentell ermittelten ab (siehe Abbildung 26 und Abbildung 47). Der Vergleich der Fallgeschwindigkeiten eines Würfels bestätigt die Genauigkeit der Simulation (siehe Abbildung 48). Hier unterscheiden sich Simulation und Experiment um 3.4 %. Insgesamt lassen sich die Fallschachtversuche realitätsnah simulieren.

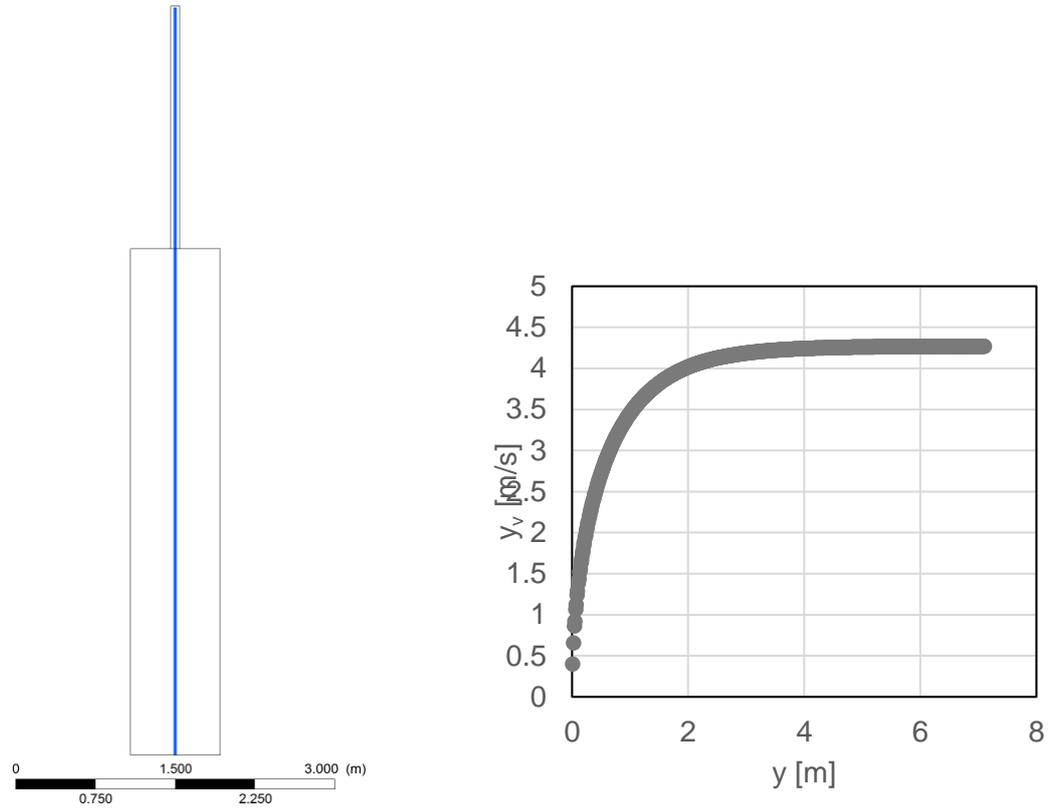


Abbildung 47. Fallschacht Simulationsdomäne (links) und berechnete Fallgeschwindigkeit einer Kugel (rechts).

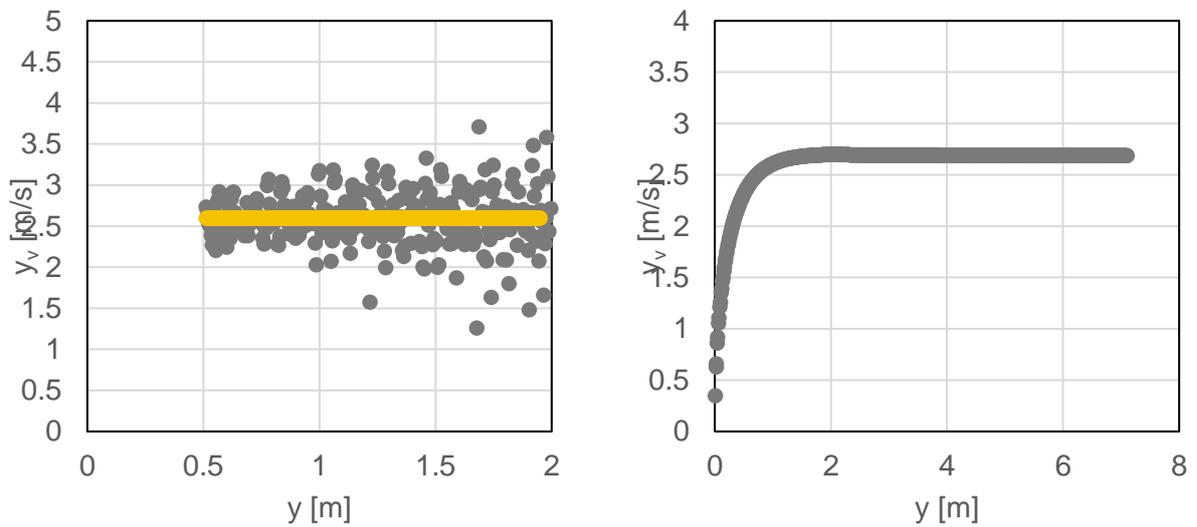


Abbildung 48. Vergleich der experimentell (links) und simulierten (rechts) Fallgeschwindigkeiten eines Würfels.

2.6 AP5: Modifikation und Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage BRENDA (FS2, 4,5 PM)

Für die Untersuchungen des Flug- und Verbrennungsverhaltens reagierender Partikel hat das ITC eine halbtechnische Versuchsanlage zur Verfügung gestellt.

Versuchsanlage BRENDA

Die Versuchsanlage BRENDA (**BREN**nkammer mit **DA**mpfkessel) (siehe Abbildung 49) besteht aus einer Drehrohrofenanlage (thermische Leistung 1,5 MW) mit Nachbrennkammer, Abhitzekegel und Rauchgasreinigung, die den Anforderungen der 17. BImSchV entspricht. In die Nachbrennkammer ist ein Mehrstoffbrenner mit einer thermischen Leistung von 1 MW integriert, über den staubförmigen Brennstoffen sowohl über eine Zentrallanze als auch über einen Ringspalt zugeführt werden können.

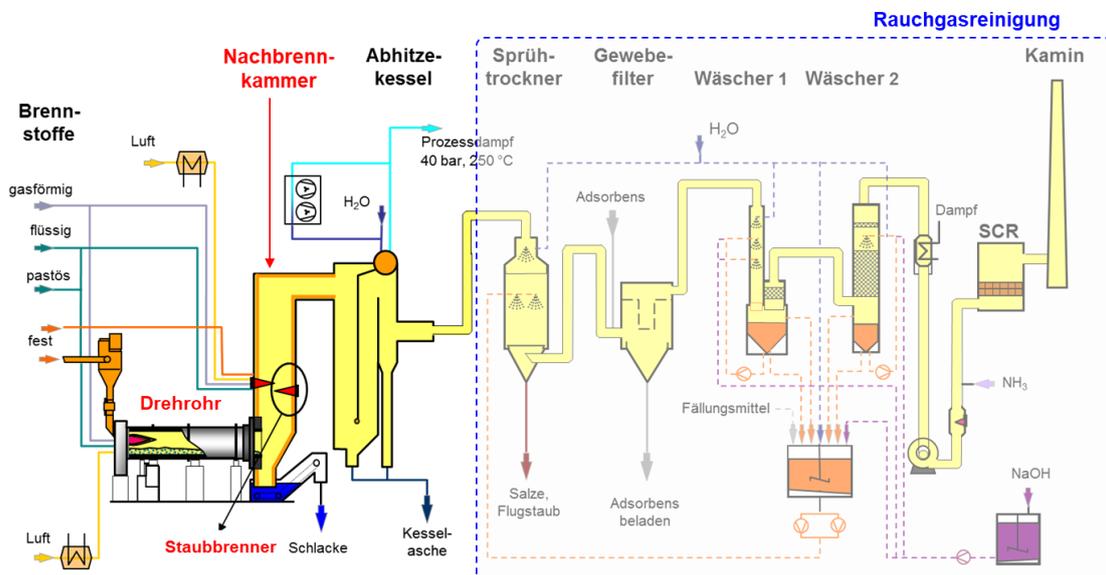


Abbildung 49. Schematische Darstellung der Versuchsanlage BRENDA.

Mit Hilfe dieses Staubbrenners können staubförmige Brennstoffe (Abfälle und Biomasse basierte Ersatzbrennstoffe) hinsichtlich ihrer energetischen und stofflichen Nutzung im Bereich der Kraftwerkstechnik und Grundstoffindustrie untersucht und charakterisiert werden, um beispielsweise fossile Energieträger zu substituieren.

Über ein vielseitiges Brennstoffaufgabesystem können dem Verbrennungsprozess im Drehrohr darüber hinaus Brennstoffe unterschiedlicher Konsistenz (z. B. gasförmig, flüssig, pastös oder fest) und variabler Stückigkeit (z. B. Gebinde) zugeführt werden. Die Anlage verfügt über eine thermische Gesamtleistung von ca. 2,5 MW. Aus der Nachbrennkammer gelangt das etwa 850 bis 1200 °C heiße Rauchgas in den Abhitzekegel, wo es auf etwa 300 °C abgekühlt und mit der Wärme Sattdampf von 250 °C und 40 bar erzeugt wird. Ein Teil des Dampfes wird zur Wiederaufheizung des Rauchgases vor dem Katalysator (am Ende der Rauchgasreinigung) und zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Der Restdampf kondensiert in einem Luftkondensator auf dem Dach der Anlage und wird als Speisewasser zurück zum Kessel geführt. Nach dem Kessel wird das Rauchgas in die mehrstufige Rauchgasreinigung geführt. Die Rauchgasreinigung umfasst einen Sprühtrockner, einen Flugstromadsorber, Gewebefilter, 2-

stufige Rauchgaswäsche (Stufe 1 – sauer betrieben, Stufe 2 - neutraler Wäscher) sowie eine SCR-Anlage. Das gereinigte Abgas (Reingas) wird schließlich über einen Kamin in die Atmosphäre abgegeben.

Durchgeführte Arbeiten

Die Versuchsanlage BRENDA wurde für die im Projekt geplanten Versuche zur FLUFF-Verbrennung mit zwei wassergekühlten Lanzen ausgerüstet. Für die Fallschachtversuche wurde eine gerade Lanze (Lanze L1) mit einer Gesamtlänge von 5,5 m und einem Innendurchmesser von 40 mm angefertigt und durch eine Bohrung an der Nachbrennkammerdecke eingeführt (siehe Abbildung 50).

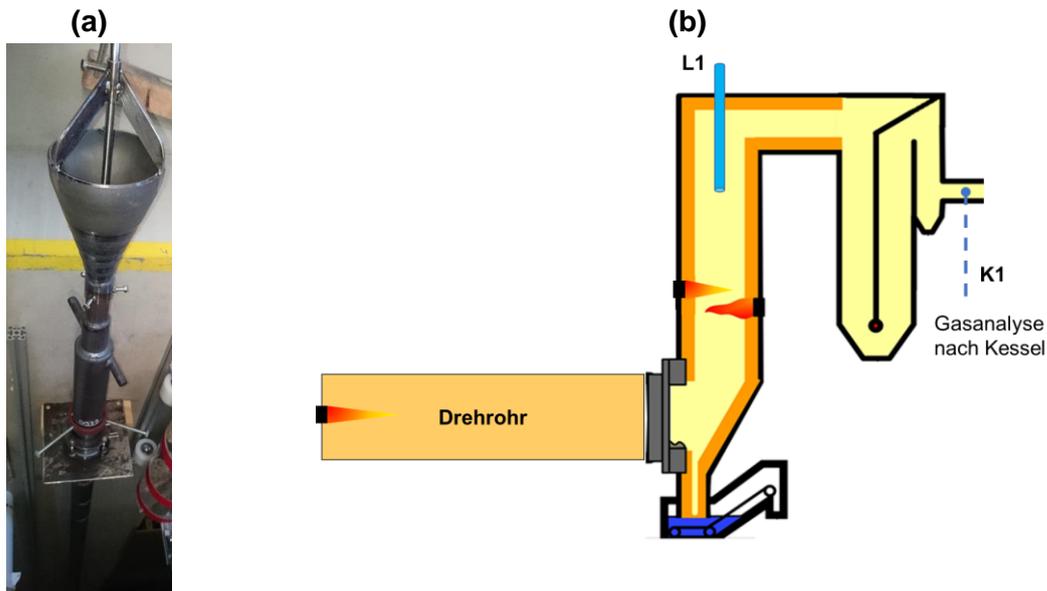


Abbildung 50. Gerade Lanze L1 (a), Einbaustelle an BRENDA (b).

Die Lanze für die Verbrennungsversuche im Drehrohrofen (DRO) wurde L-förmig angefertigt, da sie nur so durch die Schurre an der Stirnseite des DRO eingeführt werden kann (siehe Abbildung 51). Der Innendurchmesser beträgt wie bei der Lanze L1 40 mm.

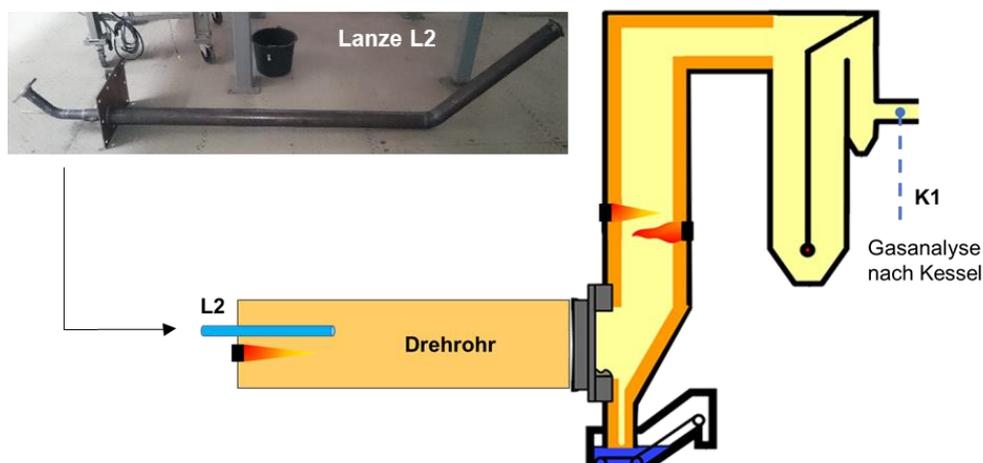


Abbildung 51. L-förmige Lanze L2 und Einsatzposition am Drehrohr.

Um den FLUFF durch die Lanzen fördern zu können, besitzt jede Lanze einen Druckluftanschluss. Wasserleitungen zur Kühlung der Lanzen wurden entsprechend eingerichtet. Um eine Kameraaufnahme während der Verbrennungsversuche am DRO zu ermöglichen, wurde ein Ständer mit Luftkühlung gegenüber der Stirnseite angefertigt. Für die Fallschachtversuche wurde eine Bohrung seitlich an der Nachbrennkammerwand angebracht.

Auf der Decke von der Nachbrennkammer (NBK) wurde eine zusätzliche Öffnung für die Kamera angefertigt. Dies ermöglicht eine Positionierung des optischen Messsystems (Lichtfeldkamera) für die „Fallschacht“-Versuche parallel zu den Flugbahnen der Partikel, die ebenfalls von oben über eine Lanze eingeführt werden.

Um Gaskonzentrationen und Temperaturen im Drehrohrofen (DRO) zu messen, wurde an der Stirnseite (Brennerseite) eine neue Bohrung für eine Messlanze angefertigt und mit Flanschen versehen.

Erzielte Ergebnisse

Mit der Anfertigung der Lanzen zur FLUFF-Förderung für die Versuchsanlage und dazugehörige Infrastruktur sowie der Kameraaufnahmestellen wurde die erfolgreiche Durchführung der geplanten Versuche gesichert. Mit der Anfertigung der Kameraöffnung an der NBK und die Messlanzenbohrung am Drehrohr wurde die Aufnahme der FLUFF-Trajektorien sowie die Messungen von den Gaskonzentrationen und Temperaturen für die Versuche im „heißen“ Fallschacht ermöglicht.

2.7 AP 6: Entwicklung eines optischen Messsystems zur Analyse des Flug- und Zündverhaltens reagierender Partikel (FS3, 6 PM)

Durchgeführte Arbeiten

Zunächst wurde ein Lichtfeldkamera-Messsystem mit Kühlsonde zur Beobachtung der Bewegung von Ersatzbrennstoffpartikeln sowohl im Drehrohrofen als auch im heißen Fallschacht entwickelt und aufgebaut. Auf Basis der Daten der damit durchgeführten Messkampagnen wurden Verfahren zur Detektion und zum Tracking von Partikeln entwickelt. Schließlich wurden Regressionsverfahren zum Ausgleich der Schwankungen in den erhaltenen 3D-Trajektorien erarbeitet und angewendet, um glatte Trajektorien für die anschließende statistische Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens zu erhalten.

Lichtfeldkamera-Messsystem

Ein plenoptisches Kamerasystem (auch bekannt als Lichtfeldkamera) ist eine Möglichkeit, 3D-Messungen zu realisieren. Mit einem Mikrolinsenarray vor dem Bildsensor der Lichtfeldkamera kann das Lichtfeld der Szenen erfasst werden, aus dem die 3D-Informationen wiederhergestellt werden können. Im Vergleich zu Stereokamerasystemen benötigen Lichtfeldkameras nur ein einziges Hauptobjektiv und einen Bildsensor, was eine universelle Verwendbarkeit begünstigt. Inzwischen übertreffen Lichtfeldkameras die Time-of-Flight-Kameras an Auflösung und Robustheit. Die Genauigkeit und Angemessenheit fokussierter plenoptischer Kameras für Fernmessungen sind in [20] nachgewiesen. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen im Projekt, z. B. dem Aufbau der Versuchsanlage BRENDA (nur Einzeloptikzugang, Abstand

zwischen Partikel und Kamera bis zu 8 m) und eine ausreichende Auflösung, um kleine Partikel einzufangen, wurde sich für ein plenoptisches Kamerasystem entschieden

Die verwendete plenoptische Kamera der Firma Raytrix bietet eine Auflösung von 1536 Pixelx2048 Pixel mit einer Framerate von 330 Bildern pro Sekunde (fps). Das verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 85 mm für Messungen im Drehrohr und eine Brennweite von 35 mm für Messungen in der Nachbrennkammer. Außerdem besteht das Mikrolinsenarray der eingesetzten Kamera aus Mikrolinsen mit drei unterschiedlichen Brennweiten, was eine große Bandbreite an Schärfentiefe und eine hohe laterale Auflösung gleichzeitig ermöglichen kann [21]. Abbildung 52(a) zeigt ein Beispiel eines Graustufenbilds von Versuchen im Drehrohr und Abbildung 52(b) zeigt die entsprechende 3D-Tiefenkarte in Falschfarben-Darstellung.

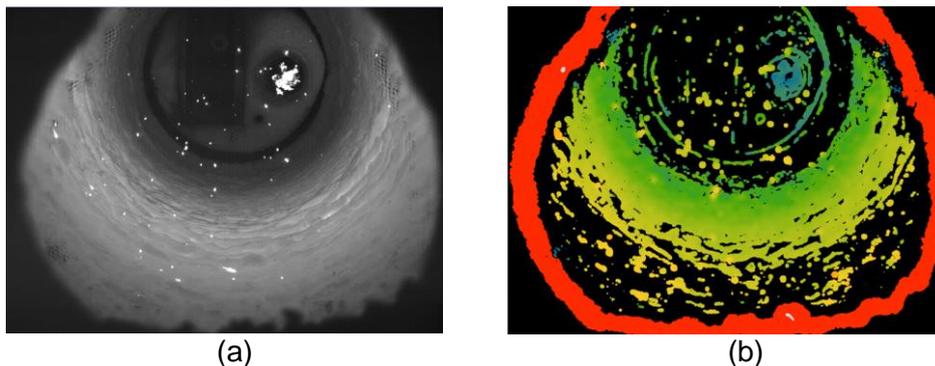


Abbildung 52. Beispiel für ein aufgenommenes Bild. (a): Total Focus Bild. Das Bild entspricht in etwa dem einer herkömmlichen Kamera. (b): Tiefenkarte. Die Tiefeninformation wird als Falschfarbenbild dargestellt. (schwarz zeigt an, dass keine Tiefeninformationen verfügbar sind).

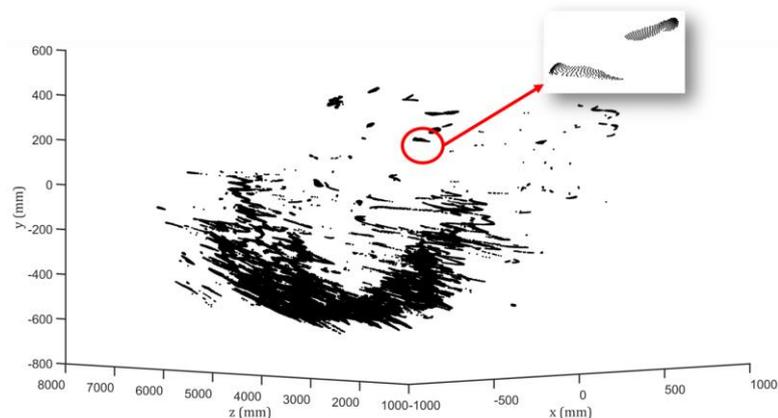


Abbildung 53. Beispiel einer erfassten Punktwolke. Die Lichtfeldkamera kann die erfassten Bildinformationen in Punktwolken konvertieren mit räumlicher Position in x-,y- und z-Koordinaten für jeden Bildpunkt, für den 3D-Informationen erfasst werden konnten.

Bildverarbeitungsmethode zur Bewertung der Aufnahmen

Wie zuvor beschrieben, kann die angewandte plenoptische Kamera sowohl den Grauwert als auch die verfügbare räumliche Position der Pixel erfassen. Anhand der gewonnenen Informationen kommen verschiedene Bildverarbeitungsmethoden zur Bewertung der Aufnahmen zum Einsatz. Hauptsächlich sind durch die Bildverarbeitung folgende drei Aufgaben zu erfüllen:

- Partikel-Detektion,
- Partikel-Tracking sowie
- Regression der räumlichen Partikel-Trajektorien.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf diese Hauptaufgaben näher eingegangen.

(a) Detektion der Brennstoffpartikel

Anhand der Grauwertbilder wurden mehrere 2D-Detektionsansätze untersucht, wie z.B. die OTSU-Schwellenwert-Methode [22] oder das Scale Invariant Feature Transform (SIFT) Verfahren [6]. Zusätzlich können die Partikel auch durch die Bildung von Clustern in den Punktwolken mit der DBSCAN-Methode [23] detektiert werden. Beide Detektionskonzepte (2D und 3D) wurden für die gesammelten Datensätze implementiert. Um die Ergebnisse quantitativ auszuwerten zu können, wurden die Partikel in 50 nicht aufeinanderfolgenden Bildern manuell markiert, was später als Ground Truth mit den Detektionsergebnissen verglichen wird.

Für die 2D grauwertbasierte Partikel-Detektion (2D-SIFT-Algorithmus) wurde eine Hintergrundsubtraktion als Vorverarbeitung zur Reduzierung der Auswirkung vom Hintergrund implementiert. Es wurden verschiedene Hintergrundsubtraktionsalgorithmen untersucht, deren Performanz in Abbildung 54 schematisch anhand der erreichten F_1 -Score dargestellt wird. Zum Vergleich der verschiedenen Hintergrundsubtraktionsalgorithmen wurden sie zusammen mit dem SIFT-Algorithmus getestet. Zur Auswahl der optimalen Parameter für SIFT wurde die Kreuzvalidierung verwendet, wobei für jeden Test mit 40 Bildern als Trainingsdaten die optimalen Parameter ermittelt und auf die restlichen 10 Bilder (Testdaten) angewandt wurden. Das Detektionsergebnis wurde nachher mit der Ground Truth auf Basis der F_1 -Score verglichen.

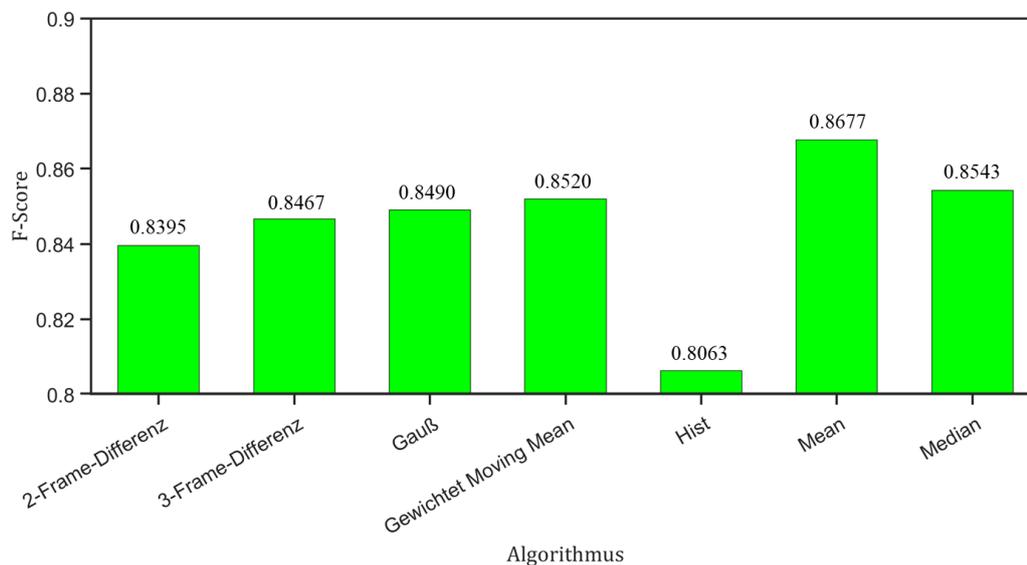


Abbildung 54. F_1 -Score erzielt mit verschiedenen Hintergrundsubtraktionsmethoden in Verbindung mit der Partikeldetektion per SIFT-Algorithmus.

Wie in Abbildung 54 dargestellt, liefern die Mean- und Median-Hintergrundsubtraktionsmethoden die höchsten Werte im F_1 -Score. Jedoch weist der mit der Mittelwertmethode erzeugte Hintergrund Partikelbahnen auf, wie in Abbildung 55(a) zu erkennen, die bei späteren Auswertungen im neuen kombinierten Detektionsverfahren zu Problemen führen können. Daher wurde sich bei der Auswertung der Experimente für die Medianmethode entschieden. Das Hintergrundmodell wird durch Berechnung des zeitlichen Grauwert-Median für jedes Pixel

innerhalb eines Zeitraums (im Allgemeinen 75 vorherige Frames und 75 nachfolgende Frames) erhalten. Wegen der langsamen Drehung des Drehrohrofens, sollte der gewählte Filterzeitraum (z.B. 150 Frames) für die Hintergrundschätzung lang genug gewählt werden, um schnell bewegende Brennstoffpartikel auszuschließen. Gleichzeitig muss der Filterzeitraum auch kurz genug zur Vermeidung der Verzerrung des Hintergrundmodells durch die Drehbewegung sein.

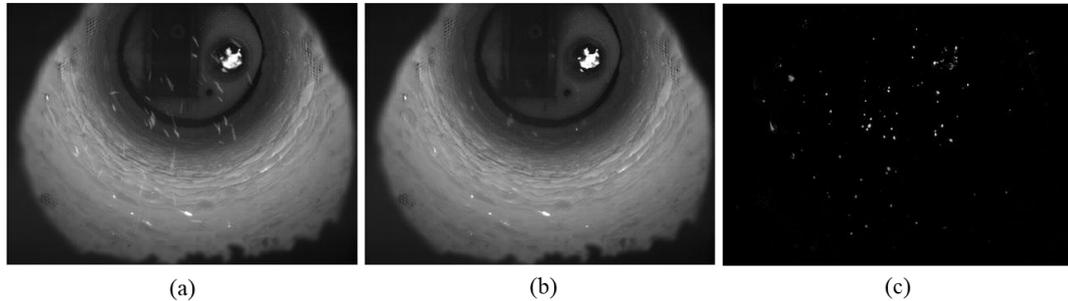


Abbildung 55. Beispiel zur Hintergrundsubtraktion. (a) Errechnetes Mean-Hintergrundbild (b) Errechnetes Median-Hintergrundbild (c) Ergebnis der Hintergrundsubtraktion

Nach der Hintergrundsubtraktion sind der 2D-SIFT-Algorithmus und das 3D-DBSCAN Verfahren zunächst separat zum Einsatz gekommen, und die erhaltenen Ergebnisse werden durch die Ground Truth quantitativ bewertet. In Abbildung 56 sind die Ergebnisse zum visuellen Vergleich dargestellt, wobei das 3D-Clustering-Ergebnis durch Berechnung der zentral gewichteten Grauwerte der Cluster in 2D-Pixelposition konvertiert wurde.

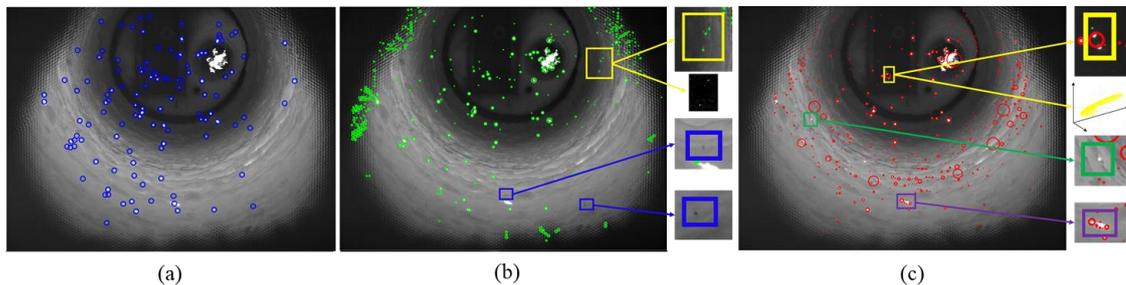


Abbildung 56. Ergebnis der Partikeldetektion. (a): Manuell markierte Ground Truth. Jeder blaue Kreis zeigt ein Partikel an. (b): Detektionsergebnis von 2D-SIFT. Der Mittelpunkt eines grünen Kreises entspricht der Position des erkannten Partikels, dessen Größe durch den Radius der Kreise angezeigt wird. (c): Erkennungsergebnis von 3D-DBSCAN. Der Mittelpunkt jedes roten Kreises entspricht dem Zentrum des Clusters. Der Radius des Kreises gibt die Größe des Clusters an.

Wie in Abbildung 56 zu erkennen ist, gibt es in den Randbereichen des Bildes eine erhebliche Anzahl von Artefakten, die durch die Kamera entstehen. Dieses Problem wird später durch die Einführung einer geeigneten Region of Interest (ROI) gelöst. Trotz der definierten ROI zeigen beide Detektionsergebnisse in Abbildung 56 individuelle Schwächen auf. Der grauwertbasierte 2D-SIFT-Algorithmus ist nicht in der Lage, Partikel mit geringer Helligkeit zu erkennen, wie in den blauen Kästen in Abbildung 56(b) dargestellt. Außerdem können aufgrund von Störungen im geschätzten Hintergrundbild Grauwertspitzen im Vordergrundbild nach der Hintergrundsubtraktion auftreten, wo kein Partikel vorhanden ist, wie in dem gelben Kasten in Abbildung 56(b) dargestellt. Da die Hintergrundsubtraktion eine universelle Vorverarbeitung für die Partikelerkennung zur Reduzierung der Störungen im Hintergrundbild ist, stellen die daraus auftretenden Detektionsfehler ein wesentliches Hindernis für die Erkennung dar. Im Gegensatz

zu Grauwert-basierten Erkennungsansätzen, sind 3D-Clustering-Methoden weniger empfindlich gegenüber diesen Problemen. Die Leistung der Clustering-Methoden wird jedoch durch andere Faktoren eingeschränkt, z. B. durch die Verteilung der Punkte innerhalb der Wolke. Für ein relativ großes Partikel können aufgrund der ungünstigen Punktverteilung innerhalb des Partikels mehrere Cluster gebildet werden, wie in dem lila Kasten in Abbildung 56(c) dargestellt. Darüber hinaus können mehrere Partikel als ein Cluster identifiziert werden, da ihre entsprechenden Punktwolken räumlich verbunden sind, wie im gelben Kasten in Abbildung 56(c) dargestellt. In ähnlicher Weise können Partikel, die an der Wand liegen, in den Cluster des Drehofens aufgenommen werden, was zu fehlenden Erkennungen führt, wie das im grünen Kasten markierte Beispiel.

Aus den beschriebenen Gründen wurde im Rahmen des Projekts ein neuer, kombinierter Detektionsansatz entwickelt, der den grauwertbasierten Algorithmus 2D-SIFT und die 3D-Clustermethode DBSCAN miteinander kombiniert. Der Aufbau des neuen Ansatzes ist in Abbildung 57 schematisch dargestellt. Zunächst separat 2D-SIFT und 3D-Clustering implementiert. Wie bereits erwähnt, kann der Hintergrund für die Vorverarbeitung modelliert werden, indem der zeitliche Median des Grauwerts für jeden Pixel innerhalb einer bestimmten Zeitintervall berechnet werden. Zur Vermeidung negativer Einflüsse der Flamme auf die Partikelerkennung wird auch die Flamme im Bild vor der Detektion segmentiert und die erkannte Flammenregion aus der ROI entfernt. Wie in Abbildung 56 dargestellt, wird die Clustering-Methode DBSCAN zweimal mit unterschiedlichen Parameterwerten eingesetzt. In Übereinstimmung mit der Definition von DBSCAN [23] steht ε für die Größe des Suchradius um einen Punkt, und $minPts$ steht für den Schwellwert der Punktmenge innerhalb des Suchradius, damit ein Punkt als Kernpunkt angesehen wird. Ein großes ε und ein kleiner $minPts$ begünstigen die Bildung von großen Clustern, z. B. die Innenwand des Drehrohrens, während im Gegensatz dazu ein kleines ε und ein großer $minPts$ dabei helfen können, kleine Partikel voneinander zu unterscheiden. Nach der Durchführung des ersten Clustering wird der Cluster, der den Drehrohren repräsentiert, und die entsprechenden Punkte zusammen mit den Punkten der segmentierten Flamme aus der Punktwolke entfernt, um die Durchführung des zweiten Clustering zu erleichtern.

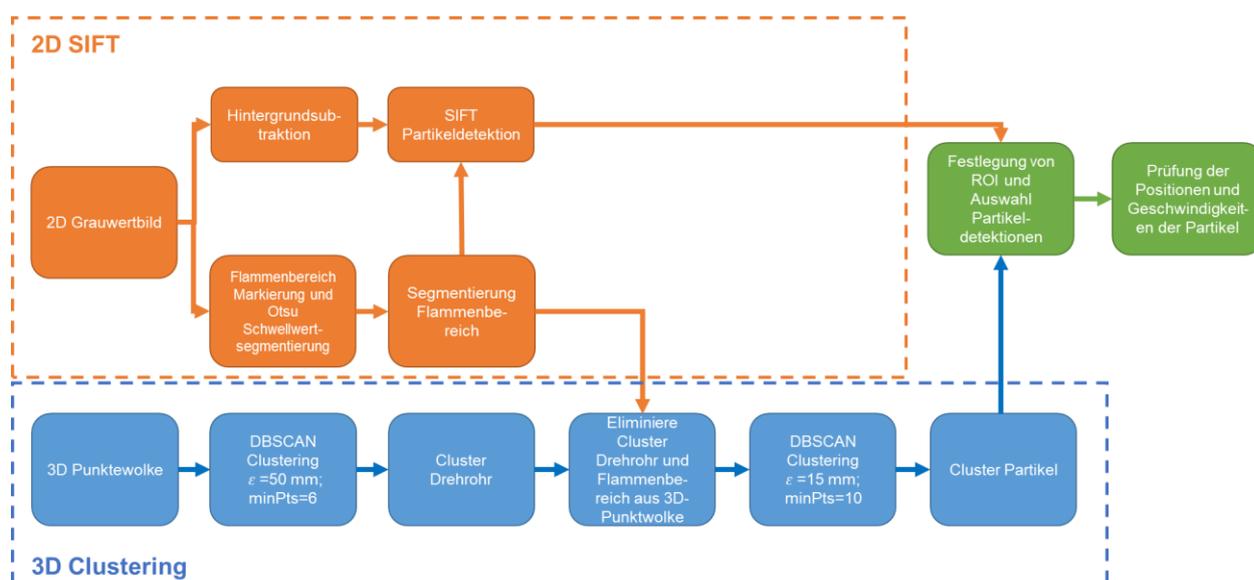


Abbildung 57. Schematische Darstellung des Ablaufes der kombinierten Partikel-detektion.

Nach separater Durchführung der 2D- und 3D-Algorithmen werden die Detektionsergebnisse kombiniert. Zunächst wird eine Region von Interesse (ROI) definiert, um die peripheren Artefakte im Bild und die erkannte Flammenregion auszuschließen. Anschließend werden die Detektionsergebnisse von 2D-SIFT und 3D-DBSCAN miteinander verglichen und validiert. Um den Vergleich zu erleichtern, werden die gebildeten 3D-Cluster in 2D umgewandelt, indem die Punkte in Pixel-Koordinaten transformiert werden. Unter Berücksichtigung der Partikeldetektionen in Bezug auf ihrer Größe können die folgenden fünf Fälle für den Vergleich unterschieden werden:

- Fall 1: Ein Partikelkandidat wird von beiden Methoden als genau ein Partikel identifiziert.
- Fall 2: Ein Partikelkandidat wird von dem SIFT-Algorithmus als einzelner Partikel erkannt, wird aber vom Clustering als mehrere Partikel identifiziert.
- Fall 3: Ein Partikelkandidat wird als einzelner Partikel vom Clustering erkannt, aber als mehr als ein Partikel durch den SIFT-Algorithmus identifiziert.
- Fall 4: Ein Partikelkandidat wird nur durch den Clustering-Ansatz entdeckt.
- Fall 5: Ein Partikelkandidat wird nur durch den SIFT-Algorithmus entdeckt.

Um die genannten Fälle zu behandeln, wird die in Abbildung 58 dargestellte Logik angewendet. Wenn die beide Methoden eine Partikeldetektion validieren, wird diese Detektion direkt in das Ergebnis übernommen (Fall 1). Im Falle unterschiedlicher quantitativer Detektionsergebnisse, wie in Fall 2 und Fall 3, wird die Grauwertverteilung im aktuellen Bild um die gesamte Partikelfläche analysiert, um die genaue Anzahl der Partikel zu bestimmen. Unter der Bedingung, dass die Partikeldetektion nur durch einen Ansatz bestätigt wird (Fall 4 und 5), wird die Grauwertverteilung des Partikels im aktuellen Bild und im aktuellen Differenzbild (Differenz aufeinanderfolgender Bilder) untersucht. Nur wenn die Grauwertverteilung in beiden Fällen auf ein partikelähnliches Merkmal hinweist, wird das Partikel schließlich in die Erkennungsliste aufgenommen.

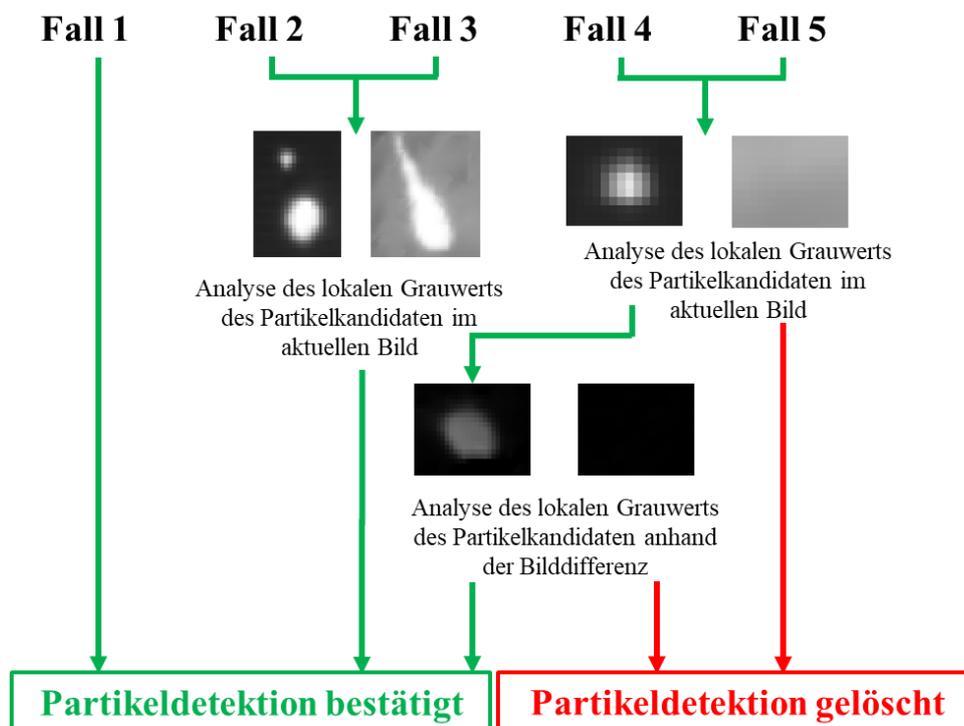


Abbildung 58. Ansatz für den Umgang mit verschiedenen Fällen.

Für eine quantitative Analyse der erzielten Detektionsergebnisse wurde ein Toolkit entwickelt, das mit Hilfe des ungarischen Algorithmus den Detektionen die Partikeln in der Ground Truth zuordnet, damit die benötigten Werte für True Positive (TP), False Positive (FP) und False Negative (FN) zur Bildung der F_1 -Score erhalten werden können. Die beschriebene neu entwickelte kombinierte Detektionsmethode wurde in [24] und in erweiterter Form in [25] veröffentlicht.

(b) Tracking von verschiedenen Brennstoffpartikeln

Um die Partikeldetektionen zu verknüpfen und vorläufige 2D-Partikel-Tracklets zu erhalten, wurden die Algorithmen Kalman-Filter mit Global Nearest Neighbor (GNN) und mit Joint Probabilistic Data Association (JPDA) zweidimensional in Pixelkoordinaten durchgeführt. Beide Algorithmen folgen einem ähnlichen Funktionsmuster: Prediction, Gating, Zuordnung und Update.

Aufgrund der plenoptischen Hochgeschwindigkeitskamera mit bis zu 330 Bildern pro Sekunde (fps) können die Partikelbewegungen innerhalb einer kleinen Anzahl aufeinanderfolgender Bilder als gleichförmige Bewegung angenähert werden. Für Prediction wird ein linearer Kalman-Filter angewendet. Um die potenziellen Detektionen für eine bestimmte Prediction einzuschränken, wird die 2D-Mahalanobis-Ellipse entsprechend eines vordefinierten Abstandes um die Prediction herum als 2D-Gating-Region berechnet. Außerdem betrachten wir auch die Tiefenänderungen als Gating-Faktor. Nur wenn eine Detektion innerhalb der Ellipse einer Prediction liegt und die Änderung der Tiefe einen definierten Grenzwert nicht überschreitet, wird die Detektion als möglicher Kandidat gewertet. Für jeden Detektionskandidaten werden die Zuordnungskosten unter Verwendung der in [26] vorgestellten Funktion berechnet. Da wir die Tiefeninformation beim Partikel-Tracking berücksichtigen, definieren wir den Tracking-Ansatz als 2,5D. In GNN bilden die gesamten berechneten Zuordnungskosten die Kostenmatrix, anhand derer eine Zuordnung von Detektionen und Tracks mit Hilfe des Kuhn-Munkres-Algorithmus [27] vorgenommen wird. Im Gegensatz zu GNN berücksichtigt JPDA alle Detektionen innerhalb des Gates und gewichtet sie für die weiteren Schritte, anstatt einer einzigen Assoziation [28]. Schließlich werden die Trajektorien in Bezug auf die Assoziationsergebnisse aktualisiert. Der hier verwendete Ansatz betrachtet alle so gewonnenen Partikelspuren als Tracklets unabhängig von deren tatsächlichen Längen und Dauern. Prinzipiell könnten auch die Tiefenänderungen in die Kostenfunktion integriert werden, um die Zuordnungsgenauigkeit zu erhöhen. Allerdings schwankt die von der Kamera gelieferte Tiefeninformation erheblich und von daher ist es nicht zuverlässig und geeignet, die Tiefen quantitativ in die Kostenfunktion zu integrieren.

Nach der Partikeldetektion und dem Partikel-Tracking könnte die Analyse der aerodynamischen Eigenschaften der Partikel im Prinzip erfolgen. Allerdings bieten die direkt gewonnenen Tracklets aufgrund von Tracking-Ungenauigkeit nicht ausreichende Zuverlässigkeit, wie unvollständige Tracklets und falsche Tracklets, die vor allem durch Ungenauigkeit der Detektion hervorgerufen werden. Daher wurde im Rahmen des Projekts ein neues Post-processing Framework für das Multi-Partikel-Tracking entwickelt, das die Bewegungsähnlichkeit der erkannten Tracklets nutzt, um vollständige Partikel-Trajektorien zuverlässig zu ermitteln. Der Ablauf ist im Flussdiagramm in Abbildung 59 dargestellt. Im Folgenden werden die vorgestellten Schritte des Frameworks schrittweise beschrieben.

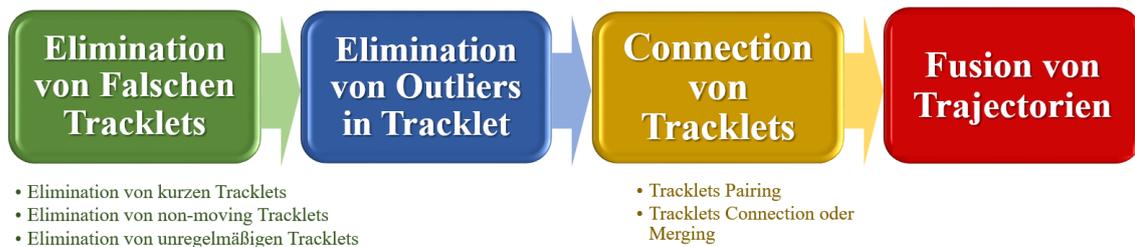


Abbildung 59. Überblick über das Post-processing Framework.

- (1) Elimination fehlerhafter Tracklets: In einem ersten Schritt werden Tracklets, die extrem kurz bzw. sehr langsam sind oder sich zu unregelmäßig bewegen, als fehlerhafte Tracklets betrachtet und entfernt.
- (2) Eliminierung von Ausreißern in jedem Tracklet: Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass falsche Detektionen in Tracklets die Trackingergebnisse stark negativ beeinflussen können, werden einzelne Ausreißer-Partikeldetektionen in den Tracklets eliminiert. Die Mehrzahl der Ausreißer ist eine Folge von erkanntem Rauschen und führt zu lokalen unregelmäßigen Spitzen in den Tracklets. Daher werden die Positionen in einem Tracklet, die einen unregelmäßigen Geschwindigkeitsvektor besitzen, zur Ausreißer-Erkennung genutzt.
- (3) Tracklet-Connection oder -Merging: Nachdem die vorherigen zwei Schritte abgeschlossen sind, kann die wichtigste Aufgabe, die Verbindung der Tracklets zu zusammenhängenden Bahnen, beginnen. Wie in Abbildung 60 dargestellt, ist die Tracklet-Connection ein iterativer Prozess, der mit dem Scannen der gesamten Tracklet-Liste nach möglichen Tracklet-Matching-Paaren anfängt. Anschließend werden die entsprechenden Paarungskosten berechnet und die Kostenmatrix entsprechend konstruiert. Basierend auf der Kostenmatrix wird die Verbindung der Dual Nearest Neighbor Paare durchgeführt, und die bestehende Tracklet-Liste wird anschließend aktualisiert. Der Prozess endet, wenn es kein mögliches Tracklet-Matching-Paar mehr gibt.
- (4) Trajektorien-Fusion: Als letzter Schritt wird die Trajektorie fusioniert. Der Schritt betrifft den Fall, wenn die Partikeldetektionsergebnisse viele Duplikate und Rauschen enthalten und ein Partikel mehr als eine erkannte Flugbahn innerhalb eines bestimmten Zeitraums erzeugt.

Das Post-processing Framework wurde in [29] publiziert.

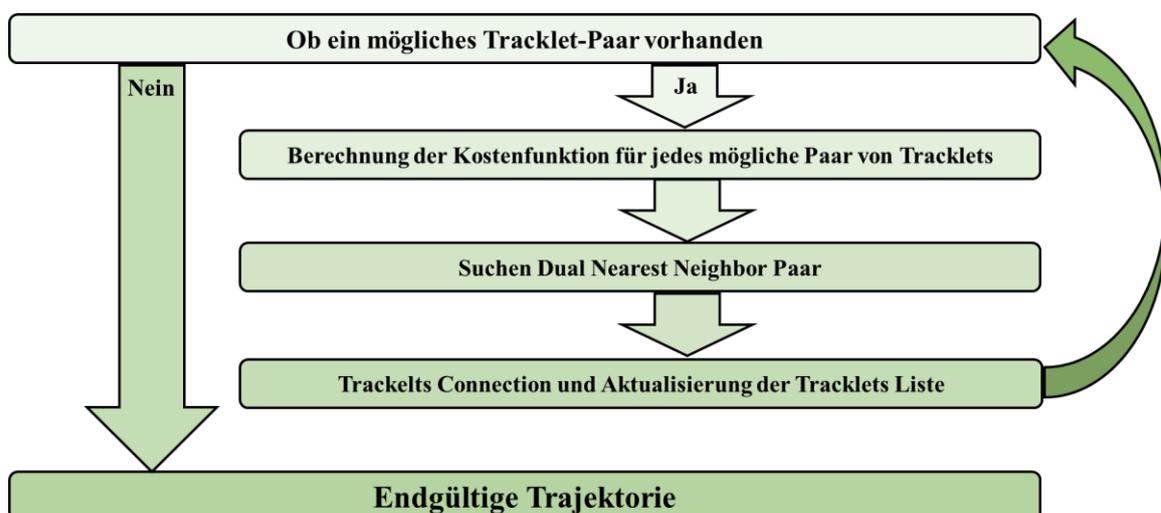


Abbildung 60. Flussdiagramm der Tracklet Connection.

(c) Regression der 3D-Trajektorien

Auf Basis der bereinigten 2D-Trajektorien werden die zugehörigen 3D-Positionen ermittelt, die aufgrund des Messprinzips große Schwankungen aufweisen. Daher wird eine 3D-Polynomregression der erhaltenen Partikeltrajektorien und basierend auf den in [30] beschriebenen Parametern ausgewertet. Um eine mathematische Beschreibung der Partikelflugbahnen zu erhalten und damit eine detaillierte Auswertung durchführen zu können, werden die 3D-Partikeltrajektorien mit lokalen Fluktuationen durch Polynome in drei unabhängigen Dimensionen geschätzt. In jeder Richtung ist die Koordinate eines Partikels eine Funktion der Zeit, und drei gleichzeitige Koordinaten bestimmen die vorübergehende räumliche Position des Partikels. Daher kann das Richtungspolynom separat und mit unterschiedlichen Ordnungen geschätzt werden. Allerdings müssen als Randbedingung alle Polynome zu einem gleichen Zeitpunkt die 3D-Position der Brennstofflanze ergeben. Damit wird gleichzeitig auch dieser Zeitpunkt des Einbringens des Partikels in den Ofen innerhalb der Regression ermittelt, auch wenn der Partikel erst zu einem späteren Zeitpunkt zum ersten Mal sichtbar wird. Die Polynomregression wird durch die Lösung der kleinsten Quadrate unter Verwendung des Vertrauensbereichsansatzes [31] berechnet.

Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden neue Verfahren zur Partikeldetektion und zum Partikel Tracking entwickelt und unter anderem durch drei Masterarbeiten über Hintergrundsubtraktion, Partikeldetektion sowie Partikel Tracking begleitet. Anhand des neu entwickelten Partikeldetektionsalgorithmus konnten Auswertungen der Messkampagne durchgeführt werden. Anschließend wurden die Detektionen mit Hilfe des 2,5D-Tracking-Verfahrens zusammen mit einem neuartigen Post-processing Framework zu vollständigen Partikeltrajektorien verarbeitet. Schließlich wurden eine spezielle 3D-Regression implementiert, die die 2D-Partikeltrajektorien über die stark schwankenden 3D-Positionen in glatte 3D-Partikelbahnen umwandelt.

Ergebnis der Partikeldetektion

(a) Ground Truth

Für den Anwendungsfall der fliegenden EBS-Partikel in einem Drehrohrofen ergeben sich für jedes Pixel die in Tabelle 8 aufgeführten Klassen. Der Drehrohrofen wird als Hintergrund betrachtet. Die in den Bildern sichtbare Flamme trägt zu einer konstanten inneren Temperatur des Drehofens während der Experimente bei. Für die Detektion von Partikeln wird sie als Störsignal betrachtet, da es ähnliche Grauwerte wie brennende Partikel aufweist und Partikel verdecken kann. Die Klasse Partikel an der Wand enthält nur brennende Partikel, da aufgrund der hohen Wandtemperatur des Drehrohrofens EBS-Partikel sofort zünden und verbrennen, wenn sie auf der Wand landen. Die für die Partikelerkennung interessanten EBS-Partikel, die für die Partikelerkennung von Interesse sind, können daher in drei Klassen unterteilt werden, je nachdem, ob sie brennen oder nicht und ob sie sich in der Luft oder an der Wand befinden. Brennende Partikel haben einen deutlich höheren Grauwert im Bild als nicht brennende Partikel und können daher anhand ihres Grauwerts klassifiziert werden. Für jedes Graustufenbild wird ein beschriftetes Ground-Truth-Bild erstellt, in dem jedes Pixel einer Klasse zugeordnet ist. Das beschriftete Bild hat die gleiche Bildgröße von 2048 Pixeln x 1536 Pixeln wie das Originalbild, und die Klassen werden durch den Grauwert der Pixel sowie die Bewegungen der Partikel definiert. Die Grauwerte für jede Klasse in der 2D Ground Truth entsprechen den Labeln in Tabelle 8.

Abbildung 61 zeigt ein Beispiel für 2D Ground Truth als Überlagerung über dem entsprechenden Graustufenbild aus den Rohdaten.

Tabelle 8. Klassen für fliegende EBS-Partikel in einem Drehrohrföfen sowie weitere Bildelemente und ihre zugehörigen Bezeichnungen in der Ground Truth.

Klasse	Label
Drehrohr	0
Flamme	1
Brennende Partikel in der Luft	2
Nicht Brennende Partikel in der Luft	3
Brennende Partikel an der Wand	4

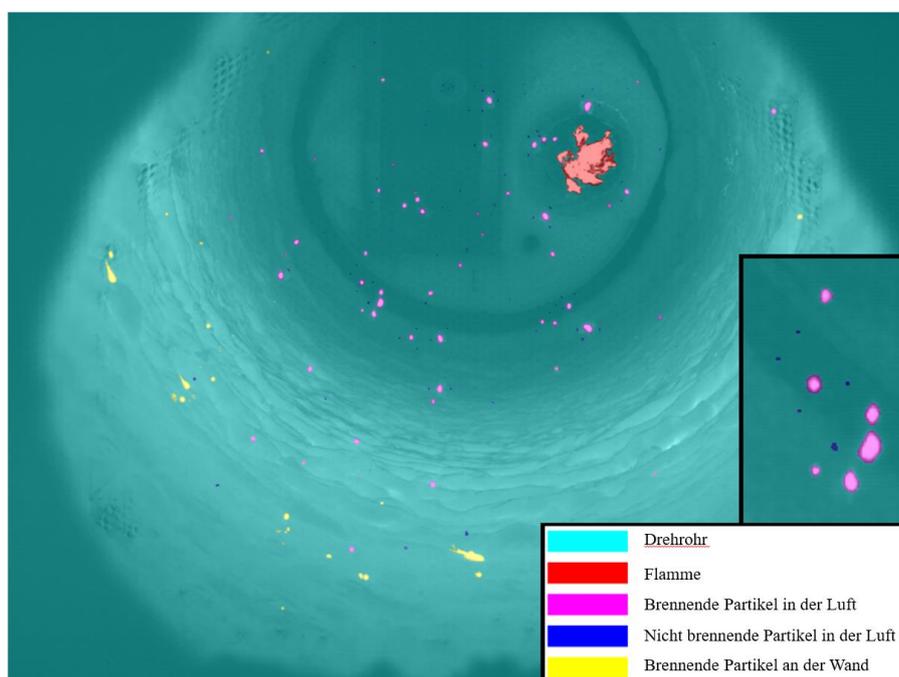


Abbildung 61. Beispiel für das beschriftete Ground Truth Bild für das gesamte Bild und eines ausgeschnittenen Bildbereichs als Overlay über dem entsprechenden Graustufenbild aus den Rohdaten (Drehrohr).

Zusätzlich zu dem vollständig beschrifteten Ground-Truth-Bild kann die Position der im Bild enthaltenen Partikel auch über die Koordinaten des Schwerpunkts in Bildkoordinaten (u,v) gespeichert werden. Diese Koordinaten sind in separaten TXT-Dateien als Listen für brennende Partikel in der Luft, nicht brennende Partikel in der Luft und Partikel an der Wand klassifiziert. Zusätzlich zu den Koordinaten enthalten diese Listen in einer dritten Spalte auch die Information, ob für das Partikel 3D-Informationen aus der Punktwolke vorhanden sind. Wenn für die Koordinate 3D-Informationen vorhanden sind, wird in der dritten Spalte der entsprechenden Zeile eine 1 eingetragen. Wenn keine 3D-Informationen verfügbar sind, wird eine 0 eingetragen. Abbildung 62 zeigt einen Auszug aus einer der beschriebenen TXT-Dateien für brennende Partikeln mit den Partikelkoordinaten in den ersten beiden Spalten und die binären Parameter für die 3D-Informationen in der dritten Spalte.

Number of burning particles in the air: 58

Position of particles: row / pixel, column / pixel, 3D info

500	487	1
994	547	1
355	571	1
336	585	1
613	625	1
526	628	1
582	632	1

Abbildung 62. Auszug aus einer TXT-Datei der Partikeldetektion. Mit den Koordinaten des Mittelpunkts eines Partikels in den ersten beiden Spalten und einem binären Parameter in der dritten Spalte, der angibt, ob für die Koordinate 3D-Informationen verfügbar sind.

Alle Ground-Truth-Daten wurden in Form eines Benchmark-Datensatzes zusammengefasst. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel, die in der Ground Truth enthalten sind. Die Anzahl ist für die verschiedenen Partikelklassen mit und ohne 3D-Informationen angegeben.

Tabelle 9. Anzahl der Partikel in der Ground Truth des Benchmark-Datensatzes.

Klasse	Insgesamt	Mit 3D Info	
Drehrohr	2454	2439	99,39%
Flamme	1466	1155	78,79%
Brennende Partikel in der Luft	1781	1658	93,09%
Nicht Brennende Partikel in der Luft	3920	3594	91,68%
Brennende Partikel an der Wand	5701	5252	92,12%

Der obige Ground-Truth-Datensatz enthält die Koordinaten und Klasse von Ersatzbrennstoffen in einem halb-industriellen Drehrohrofen, die eine Datenbasis für die Auswertung verschiedener 3D-Partikeldetektionsansätzen liefern kann. Dies wurde in einer Veröffentlichung [32] ausführlich beschrieben und eingereicht.

(b) Auswertung der Partikeldetektion

Da die Ground Truth nur in Pixelkoordinaten verfügbar ist, wird die Auswertung ebenfalls zweidimensional durchgeführt, indem jedes Partikel durch seine zentrale Pixelposition repräsentiert wird. Die Partikeldetektionen werden durch den Kuhn-Munkres-Algorithmus in der Ground Truth zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Partikelgröße wird der Wert von 15 Pixeln als maximale Kosten in der entsprechenden Kostenmatrix gewählt. Die erfolgreich zugeordneten Partikeldetektionen werden als True Positive (TP) bezeichnet, und im Gegensatz dazu werden die Detektionen, die nicht mit den Partikeln in der Ground Truth assoziiert werden können, als Falsch Positiv (FP) bezeichnet. Falsch Negativ (FN) bezieht sich auf die nicht zugeordneten Partikel in der Ground Truth. Die Precision (wie viele der erkannten Partikel waren richtig), der Recall (wie viele der Ground-Truth-Partikel wurden erkannt) und F_1 -Score (gewichtetes Verhältnis aus Precision und Recall) werden entsprechend berechnet. Die Ground Truth wird in fünf Datensätze entsprechend ihrer Zeitdimension unterteilt, und es wird die Kreuzvalidierung auf die Datensätze angewendet, um den optimalen Schwellenwert für SIFT zu bestimmen, wie auch schon bei der Auswertung von verschiedenen Hintergrundsubtraktionsalgorithmen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10. Bewertung der Partikeldetektion mittels 3D-DBSCAN Clustering, 2D-SIFT mit Median Hintergrundsubtraktion und dem neuen kombinierten Ansatz.

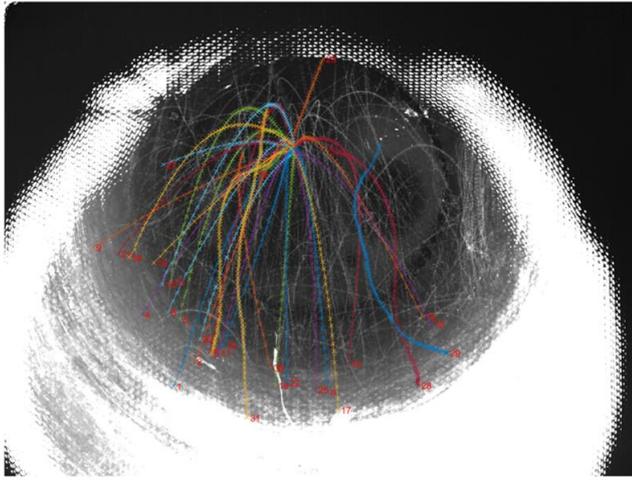
	TP	FP	FN	Precision	Recall	F ₁ -Score
Clustering	3175	4445	1212	0,4167	0,7237	0,5289
SIFT	3687	354	700	0,9124	0,8404	0,8749
Kombi	3797	229	590	0,9431	0,8655	0,9026

Offensichtlich liefert der 3D-Clustering-Ansatz die geringste Genauigkeit. Der Wert ist nur halb so hoch wie bei den anderen beiden Methoden, da das Ergebnis mehr Nicht-Partikel-Detektionen enthält, wie z. B. den Drehrohrofen. Außerdem ist der Recall des Clustering-Ansatzes ebenfalls niedrig, was zu einem unbefriedigenden F₁-Score führt. Im Vergleich zum Clustering-Ansatz erreicht der 2D-SIFT-Algorithmus eine hohe Precision von 0,9124, was auf ein Detektionsergebnis mit weniger als 10 % falschen Detektionen (Rauschen, Duplikationen) schließen lässt. Die neuartige kombinierte Methode besitzt den höchsten Recall von 0,8655, was einer Fehldetektionsrate von etwa 13,5 % entspricht. Bei diesen Fehldetektionen handelt es sich im Allgemeinen um kleine Partikel mit geringer Helligkeit und ohne räumliche Position, die sowohl von 2D-SIFT und 3D-Clustering nicht erkannt werden. Trotz der Kombination mit dem 3D-Clustering-Ansatz, der eine erhebliche Anzahl von falschen Detektionen führt, wird die Precision der kombinierten Methode auf 0,9431 erhöht. Folglich erreicht die kombinierte Methode mit 0,9026 den besten F₁-Score. In Bezug auf die Anzahl von TP, FP und FN erkennt die kombinierte Methode 110 mehr TPs und 125 weniger FPs. Darüber hinaus sind etwa 450 Partikel in der Ground Truth kleine dunkle Partikel ohne 3D-Informationen, die den maximal erreichbaren Recall-Wert aller verwendeten Ansätze begrenzt.

Ergebnis des Partikel-Tracking

(a) Ground Truth

Ähnlich wie bei der Partikeldetektion wurde jedes Partikel manuell verfolgt und seine Position zu jeder Zeit notiert, um die Performance des Partikel-Trackings quantitativ bewerten zu können. Jede Fraktion wurde über einen kontinuierlichen Zeitraum verfolgt, was etwa 1,2 Sekunden entspricht, und die Flugbahnen wurden aufgezeichnet. Diese Trajektorien wurden dann als Grundlage für die Prüfung der Ergebnisse des Partikel-Tracking verwendet. Da in dieser Arbeit nur die aus der Lanze fliegenden Partikel von Interesse sind, werden nur solche Partikel verfolgt. Abbildung 63 zeigt die Flugbahnen einer Fraktion. Diese markierten 2D-Trajektorien von verschiedenen Fraktionen sind zusammen mit der Ground Truth für Partikeldetektion ebenfalls wichtige Basisdaten.



Datei	Bearbeiten	Format	Ansicht	Hilfe
63	NaN	NaN		
64	NaN	NaN		
65	483.785714000000	936.285714000000		
66	477.842105000000	937.473684000000		
67	471.840000000000	937.440000000000		
68	465.845161000000	938.354839000000		
69	459	938.470588000000		
70	455.240000000000	938.640000000000		
71	448.833333000000	939.222222000000		
72	443.720930000000	939.232558000000		

1. Spalte: Frame
2. Spalte: Linie Koordinate von Spur
3. Spalte: Spalte Koordinate von Spur

Abbildung 63. Beispiel für die beschriftete Ground Truth von Partikel-Tracking für PE-Granulat. Links sind die geplotteten Trajektorien, rechts die in .txt gespeicherten Daten dargestellt (Drehrohr).

(b) Auswertung des Partikel-Trackings

Analog zu der Partikeldetektion wird das Partikel-Tracking quantitativ mit einem in [33] empfohlenen Tool bewertet. Die Bewertung gleicht die erhaltenen Trajektorien mit der Ground Truth ab, die für die Arbeit ebenfalls manuell beschriftet wurde. Hier sind vier Maße für die Bewertung ausschlaggebend, nämlich die normalized pairing Score α , die full normalized pairing Score β , der Jaccard similarity index für Positionen JSC und der Jaccard similarity index für Tracks JSC_{θ} . Ein Track wird als eine Reihe von aufeinanderfolgenden Positionen $\{(x(t), y(t))\}$ betrachtet, mit $t = t_0 \dots t_{end}$. Der euklidische Abstand zwischen zwei Positionen $\theta_1(t)$ und $\theta_2(t)$ ist definiert als:

$$\|\theta_1(t) - \theta_2(t)\|_{2,\epsilon} \triangleq \min(\|\theta_1(t) - \theta_2(t)\|_2, \epsilon).$$

Dabei bezeichnet ϵ das Gate. Wenn zwei Positionen mehr als ϵ voneinander entfernt sind, werden sie als unpassendes Paar betrachtet. Basierend auf dem Abstand zwischen zwei Positionen wird der Abstand zwischen zwei vorhandenen Spuren wie folgt formuliert:

$$d(\theta_1 - \theta_2) = \sum_{t=0}^{T-1} \|\theta_1(t) - \theta_2(t)\|_{2,\epsilon},$$

wobei T die Länge der Bildsequenz darstellt.

Unter der Annahme, dass es einen Satz von Tracks der Ground Truth \mathcal{X} mit $|\mathcal{X}|$ Spuren und einen Satz von Kandidatenspuren \mathcal{Y} mit $|\mathcal{Y}|$ Spuren gibt, ist der Abstand zwischen \mathcal{X} und \mathcal{Y} wie folgt definiert:

$$d(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) = \min \sum_{k=1}^{|\mathcal{X}|} d(\theta_{\mathcal{X}}^k, \theta_{\mathcal{Z}}^k), \mathcal{Z} \in \Omega_{\mathcal{Y}},$$

$\Omega_{\mathcal{Y}}$ bezeichnet die durch die Auswahl von $|\mathcal{X}|$ Spuren aus den erweiterten Kandidatenspuren $\tilde{\mathcal{Y}}$, die \mathcal{Y} um $|\mathcal{X}|$ leere Dummy-Spuren erweitern, erhaltenen Ensemblesätze von Spuren. \mathcal{Z} stellt ein beliebiges Element in $\Omega_{\mathcal{Y}}$ dar. Das Zuordnungsproblem zwischen \mathcal{X} und $\tilde{\mathcal{Y}}$ wird mit Hilfe des Kuhn-Munkres-Algorithmus gelöst.

Durch die Suche nach der optimalen Paarung $(\mathcal{X}, \mathcal{Z}^*)$ mit minimalem Abstand werden die Indizes zur Bewertung der Tracking-Performance berechnet:

- 1) Normalized pairing score α

$$\alpha(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) \triangleq 1 - d(\mathcal{X}, \mathcal{Y})/d(\mathcal{X}, \emptyset).$$

\emptyset steht für die Menge der $|\mathcal{X}|$ leeren Dummy-Spuren.

- 2) Full normalized score β

$$\beta(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) \triangleq \frac{d(\mathcal{X}, \emptyset) - d(\mathcal{X}, \mathcal{Y})}{d(\mathcal{X}, \emptyset) + d(\bar{\mathcal{Y}}, \emptyset_{\bar{\mathcal{Y}}})},$$

wobei $\bar{\mathcal{Y}}$ die Spuren in \mathcal{Y} , aber nicht in \mathcal{Z}^* bezeichnet und $\emptyset_{\bar{\mathcal{Y}}}$ für eine Menge von Dummy-Spuren mit $|\bar{\mathcal{Y}}|$ Elementen steht.

- 3) The Jaccard similarity index for positions JSC

$$JSC \triangleq \frac{TP}{TP + FN + FP}.$$

Wenn der Abstand zwischen zwei zeitlichen Positionen kleiner als ϵ ist, werden sie als übereinstimmendes Paar betrachtet. Die Anzahl der übereinstimmenden Paare von Positionen in $(\mathcal{X}, \mathcal{Z}^*)$ wird als TP bezeichnet. FN steht für die Anzahl der nicht übereinstimmenden Paare. FP steht für die Gesamtzahl der Positionen in $\bar{\mathcal{Y}}$.

- 4) The Jaccard similarity index for tracks JSC_{θ}

$$JSC_{\theta} \triangleq \frac{TP_{\theta}}{TP_{\theta} + FN_{\theta} + FP_{\theta}}.$$

TP_{θ} bezeichnet die Anzahl der Nicht-Dummy-Spuren in \mathcal{Z}^* . Im Gegensatz dazu bezeichnet FN_{θ} die Anzahl der Dummy-Spuren in \mathcal{Z}^* . FP_{θ} zählt die Anzahl der Spuren in $\bar{\mathcal{Y}}$.

Je höher die Maße sind, desto besser ist die Tracking Performance. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Partikeldetektion, wo gemischte EBS-Partikel in die Testanlage eingebracht wurden, um ein umfassendes Detektionsszenario zu schaffen, werden zur Partikelverfolgung verschiedene Brennstoffpartikelfraktionen separat gefördert, um das jeweilige Flugverhalten des Brennstoffs zu untersuchen. Insgesamt werden fünf verschiedene Brennstoffe untersucht: Holzackschnitzel, Konfetti, Papierschnipsel und PE-Granulat, Plastikfolie, wie in Abbildung 64 (a-e) dargestellt. Zunächst wird das 2,5D-Partikel Tracking mit GNN und JPDA durchgeführt. Um eine vorläufige qualitative und visuelle Bewertung der Tracking-Ergebnisse zu schaffen, addieren wir eine Reihe von Differenzbildern sowie ein einzelnes Bild zu einem einzigen Bild als optische Ground Truth, wie in Abbildung 65 gezeigt. Das Tracking-Ergebnis von GNN und JPDA ohne Nachbearbeitung ist in Abbildung 66(a) und Abbildung 66(b) dargestellt. Die identische Farbe zeigt ein identisches Tracklet an. Da der Rechenaufwand und die damit verbundene Speicherkapazität von JPDA mit steigendem Gate und der Anzahl der Tracks enorm ansteigen, wird das Gate von JPDA kleiner als das von GNN gewählt. Während die aktualisierte Varianz von JPDA wegen eines zusätzlichen Terms gemäß der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion viel größer ist als die von GNN, ist die durch JPDA ermittelte Gating-Ellipse nicht unbedingt kleiner als GNN.

Offensichtlich gibt es Unterschiede in den Tracking-Ergebnissen, wie durch die Kästen in Abbildung 66 dargestellt. Diese Unterschiede werden hauptsächlich durch unterschiedliche Schwellwerte und unterschiedliche Funktionen zur Aktualisierung der Kovarianz-Matrizen hervorgerufen.

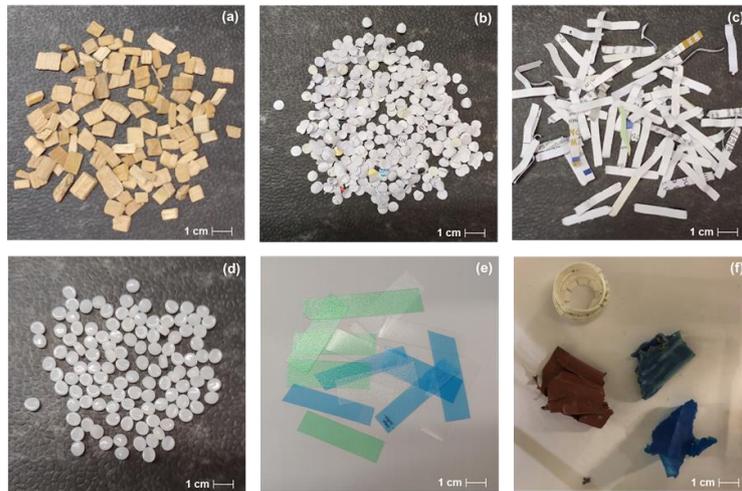


Abbildung 64. Modellfraktionen. (a) Holzhackschnitzel, (b) Konfetti, (c) Papierschnipsel (d) PE-Granulat, (e) Plastikfolie, (f) FLUFF 3D-Plastik

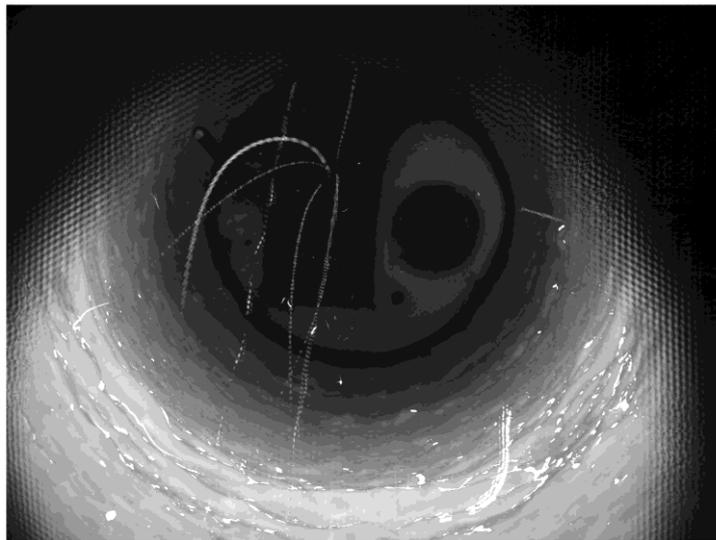


Abbildung 65. Beispiel einer optischen Ground Truth für Holzhackschnitzel (Drehrohr).

Im Allgemeinen sind die direkten Ergebnisse beider Ansätze nicht ausreichend für die weitere Analyse der Flugbahnen und Eigenschaften der Partikel. Daher wird das vorgestellte Post-processing-System auf die Tracking-Ergebnisse angewendet. Die Tracking-Ergebnisse mit Post-processing durch GNN und JPDA unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, wie schematisch in Abbildung 66 dargestellt. Im Vergleich zu den Tracking-Ergebnissen ohne Post-processing zeigen die Tracking-Ergebnisse mit Post-processing eine bessere visuelle Genauigkeit.

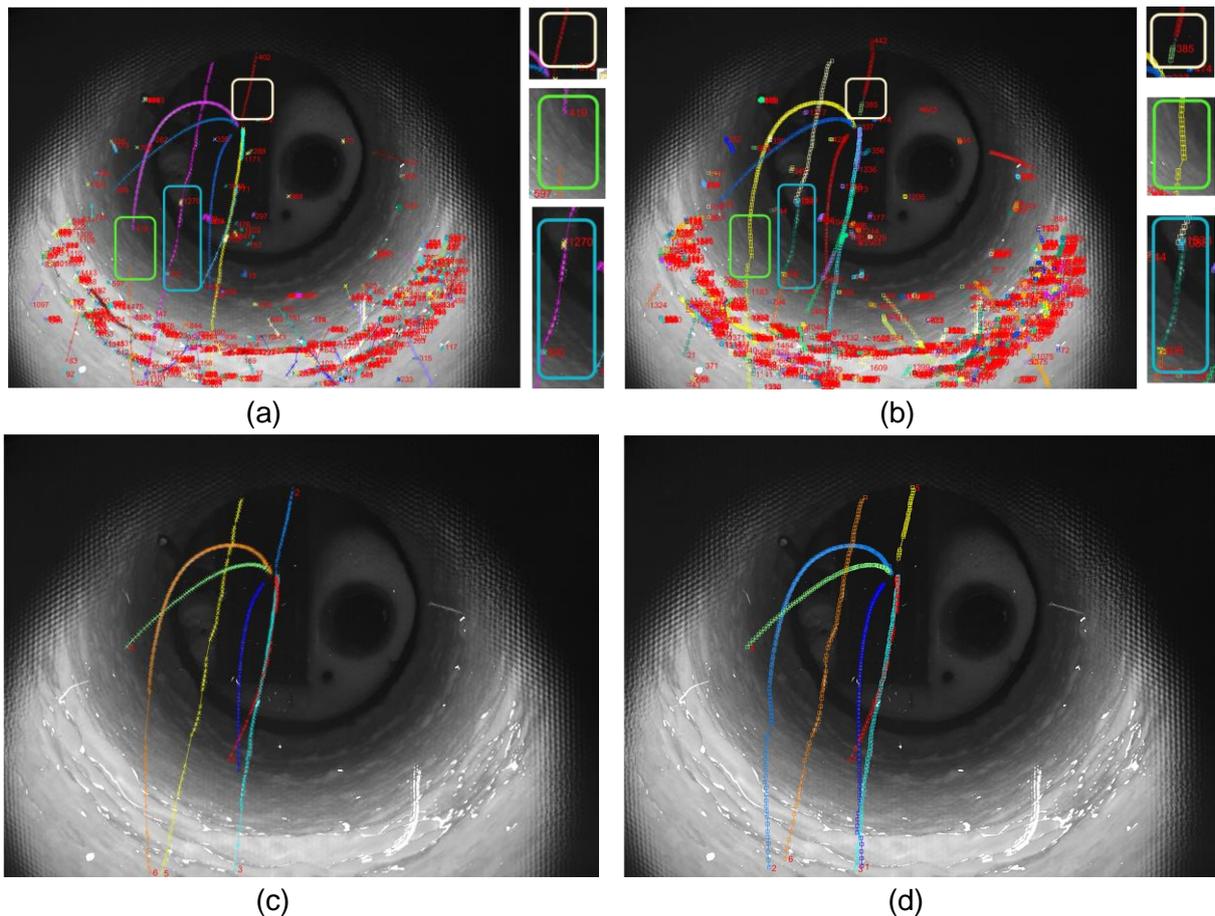


Abbildung 66. Tracking Ergebnis mit GNN und JPDA ohne und mit Post-processing. (a) Tracking Ergebnis von GNN ohne Post-processing. Kreuze stehen für Detektionen. Detektionen von gleichen Tracklets sind mit durchgezogenen Linien verbunden. (b) Tracking Ergebnis von JPDA ohne Post-processing. Die Quadrate stehen für Detektionen. Detektionen von gleichen Tracklets sind mit durchgezogenen Linien verbunden. (c) Tracking Ergebnis von GNN mit Post-processing. Detektionen von gleichen Tracklets sind mit durchgezogenen Linien verbunden. (d) Tracking Ergebnis von JPDA mit Post-processing. Die Quadrate stehen für Detektionen. Detektionen von gleichen Tracklets sind mit durchgezogenen Linien verbunden (Drehrohr).

Für den Zweck einer quantitativen Bewertung und eines Vergleichs der Tracking Performance wurden die Tracking-Ergebnisse mit Hilfe des oben erwähnten Tools bewertet. Tabelle 11 zeigt die Auswertung der Tracking Performance mit und ohne Post-processing. Da nur die Partikeltrajektorien, die von der Lanze ausgehen, für die weitere Analyse der Verhaltensweisen der Partikel von Interesse sind, wurden daher nur diese Trajektorien bewertet.

Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, sind die Tracking Ergebnisse von GNN und JPDA ohne Post-processing wegen der Unvollständigkeit und Ungenauigkeit der Tracklets relativ schlecht. Der vorgestellte Post-Processing Ansatz führt zu einer hohen Tracking Performance, wie in Tabelle 11 angegeben. Während α und β der direkten Tracking-Ergebnisse von GNN und JPDA mit Werten von etwa 0,2-0,3 für die Mehrheit der Fraktionen relativ niedrig sind, liefern die Tracking-Ergebnisse mit Post-Processing deutlich höhere α - und β -Werte um 0,5-0,6. JSC und JSC_{θ} werden ebenfalls deutlich optimiert mit bis zu etwa 40 %. Trotz der deutlichen Verbesserung des JSC durch unserer Nachbearbeitung für Konfetti (0,06 bis 0,47 und 0,08 bis 0,45), bleiben die Werte für Konfetti unter den Werten für die anderen Brennstoffe, was auf ihre schlechte Sichtbarkeit aufgrund ihrer geringen Größe zurückzuführen ist.

Tabelle 11. Bewertung der Tracking Performance mit und ohne Post-processing von GNN und JPDA. Die oberen Werte veranschaulichen die Performance von GNN und JPDA ohne Post-processing und die unteren Werte zeigen die Performance von GNN und JPDA mit Post-processing (Drehrohr)

Messung Fraktion	α		β		JSC		JSC_{θ}	
	GNN	JPDA	GNN	JPDA	GNN	JPDA	GNN	JPDA
Holzhackschnitzel	0,61	0,61	0,60	0,59	0,68	0,69	0,47	0,44
	0,67	0,68	0,67	0,68	0,76	0,79	1,0	1,0
Konfetti	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,08	0,22	0,20
	0,45	0,43	0,44	0,41	0,47	0,45	0,76	0,74
Papierschnipsel	0,15	0,19	0,14	0,18	0,20	0,29	0,43	0,42
	0,60	0,62	0,59	0,60	0,61	0,65	0,84	0,77
PE-Granulat	0,40	0,43	0,35	0,38	0,40	0,44	0,40	0,28
	0,62	0,64	0,59	0,64	0,64	0,71	0,84	0,88

Im Allgemeinen liefern GNN und JPDA vergleichbare Ergebnisse für das Tracking von EBS-Brennstoffpartikeln in dieser Arbeit. Für Messungen bezüglich der Positionsgenauigkeit, zum Beispiel α , β und JSC , zeigt JPDA einen leichten Vorteil von wenigen Prozent, da GNN den Spuren möglicherweise mehrere Rauschen zuordnet, was zu Abweichungen von wenigen Positionen führt. Da JPDA alle Detektionen innerhalb des Gates für die Aktualisierung berücksichtigt, wird die durch Rauschen verursachte Abweichung kompensiert. Hinsichtlich der Spurgenaugigkeit ist der Unterschied noch geringer als bei der Positionsgenauigkeit. Die größte Abweichung tritt bei der Verfolgung von Papierschnipseln auf, deren relativ große Größe und komplizierte Grauwertverteilung zu einer mehr FP-Detektionen führen, die zu mehreren FP-Trajektorien unter Verwendung von JPDA führen.

Obwohl GNN und JPDA eine vergleichbare Leistung bieten können, sind die Rechenkosten und die damit verbundene Speicherkapazität von JPDA viel höher, was die Anwendung für eine Langzeitverfolgung mit einer großen Anzahl von Detektionen verhindert. Allerdings ist die Langzeitverfolgung zur Akkumulation vollständigen Trajektorien die Voraussetzung für die für die Analyse des Flug- und Verbrennungsverhaltens der Partikel.

Ergebnis der 3D Regression der Trajektorien

Nach Abschluss des 2D-Partikel-Trackings werden die Trajektorien entsprechend den von der Kamera gelieferten 3D-Koordinaten in 3D umgewandelt. Hier extrahieren wir nur die 3D-Informationen für die erhaltenen Trajektorien von GNN aus folgenden drei Gründen: 1. JPDA ist nicht geeignet für langes Tracking mit vielen Partikeln. 2. JPDA berechnet die durchschnittlichen Koordinaten aller Detektionen innerhalb des Gates, was die Fluktuation der konvertierten 3D-Trajektorien verstärken kann. 3. Bei vergleichbaren Tracking-Ergebnissen ist die Verwendung von GNN mit weniger Berechnungsaufwand und Speicherkapazität verbunden. Aufgrund Schwankungen der von der Kamera gelieferten 3D-Koordinaten, schätzen wir die erhaltenen 3D-Trajektorien mit Polynomen unabhängig in drei räumlichen Richtungen mit einem Kleinste-Quadrate-Ansatz unter der Bedingung, dass jede Trajektorie in einem Zeitpunkt von der Lanze ausgeht. Die direkt konvertierten 3D-Trajektorien zusammen mit den entsprechenden geschätzten Polynomen sind in Abbildung 67 dargestellt. Darüber hinaus werden die Trajektorien nach den entsprechenden Grauwerten von den Partikeln dargestellt.

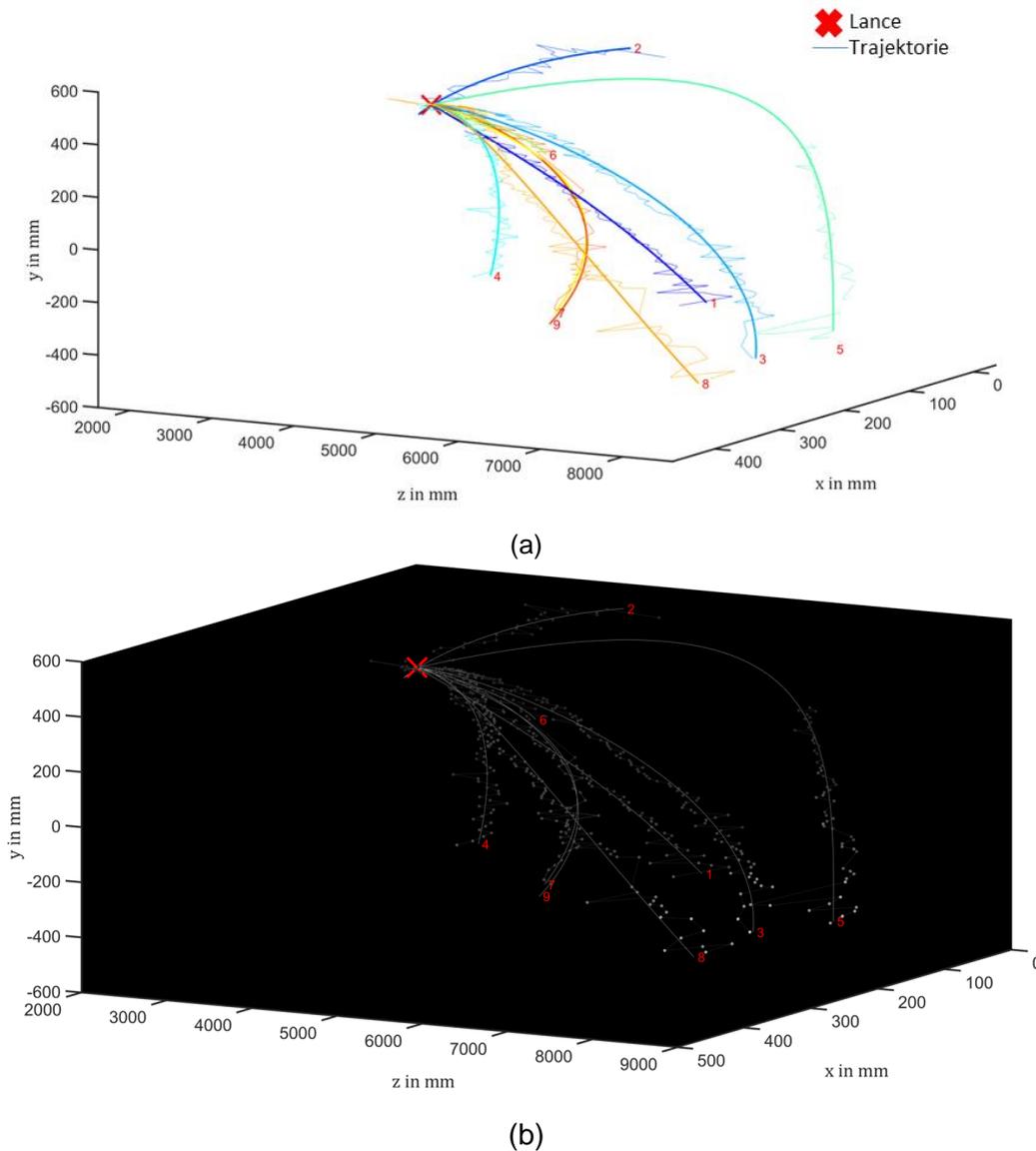


Abbildung 67. Räumliche Trajektorien von Holzhackschnitzeln. (a) Geschätzte Polynome. Rotes Kreuz steht für die Lance, dicke durchgezogene Linien sind die geschätzten Polynome und dünne durchgezogene Linien stellen die direkt konvertierten 3D-Trajektorien dar. (b) Geschätzte Polynome mit den entsprechenden Grauwerten der Partikel. Das rote Kreuz steht für die Lance, dünne durchgezogene Linien sind die geschätzten Polynome und Punkte repräsentieren die entsprechenden Grauwerte der Entdeckungen (Drehrohr).

Die erhaltenen Regressionsmodelle werden nach den in [30] ausgearbeiteten Maßstäben bewertet, d. h. root mean squared error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), R-squared R^2 und adjusted R-squared R^* . Tabelle 12 dokumentiert die Auswertung der Trajektorien verschiedener Brennstoff Partikel. Da die Fluktuation in der Tiefenrichtung am stärksten ist, ist der RMSE in der z-Richtung deutlich größer als in den beiden anderen Richtungen. Im Gegensatz dazu ist der MAPE in der z-Richtung am niedrigsten, was auf relativ große Tiefenkoordinaten des Partikels liegt. Im Allgemeinen sind R^2 und R^* in der x- und y-Richtung ungefähr 0,9, was auf die Angemessenheit des Regressionsmodells hinweist. R^2 und R^* in der z-Richtung liegen aufgrund der Fluktuationen bei kleineren Werten.

Tabelle 12. Ergebnisse der Regression der 3D-Partikel-Trajektorien.

Messung	Ordnung	RMSE	MAPE	R ²	R*
	x	x	x	x	x
Fraktion	y	y	y	y	y
	z	z	z	z	z
Holzhackschnitzel	2	11,39	14,49	0,97	0,97
	3	10,90	13,64	0,93	0,92
	3	222,41	1,69	0,76	0,68
Konfetti	3	13,79	9,61	0,90	0,88
	3	14,82	17,24	0,92	0,91
	3	269,91	2,48	0,47	0,41
Papierschnipsel	3	10,94	3,81	0,90	0,85
	3	10,80	9,35	0,91	0,87
	3	185,88	1,93	0,58	0,47
PE-Granulat	3	6,67	2,56	0,97	0,97
	2	15,67	9,02	0,97	0,97
	3	171,74	1,47	0,94	0,94

2.8 AP7: Versuche in einem „heißen“ Fallschacht an reagierenden Partikeln im Flugstrom (FS2, 7 PM, FS1, 2 PM, FS3, 7 PM)

Durchgeführte Arbeiten

Die Verbrennungsversuche unterteilen sich in Untersuchungen mit zerkleinerten, sowie mit nicht zerkleinerten (wie geliefert) FLUFF (siehe Abbildung 68).



Abbildung 68. FLUFF in geliefertem Zustand (a) und zerkleinert (b).

Geringe Massenströme FLUFF (einige Gramm) konnten manuell der Lanze L1 zugeführt werden, so dass die Partikel in „dünnen“ Strahlen (vereinzelt) schwerkraftgetrieben nach unten fallen. Dies ermöglicht Kameraaufnahmen der Flugtrajektorien der einzelnen Partikel. Der FLUFF wurde mittels Druckluft durch die Lanze gefördert. Nach dem reinen Fallschachtbetrieb (nur schwerkraftgetriebene Bewegung) wurden die Partikel im Gegenstrom mit kalter Luft bzw. Heißgas angeströmt, um die Partikelgeschwindigkeiten zu beeinflussen (Versuchsdetails siehe Tabelle 13).

Tabelle 13. Versuchsparameter Fallschachtversuche.

	FLUFF	Partikelgröße [mm]	Vol. Strom Förderluft [m _N ³ /h]	Geschwindigkeit (Austritt) [m/s]	Temperatur NBK [°C]	Partikeldetektion	Gegenstrom (gem. nach Kessel) [m _N ³ /h]
Fallschacht "kalt"	zerkleinert	□ 5	0 bis 114	5 bis 24	20	Innenbeleuchtung NBK	0 bzw. 500
	nicht zerkleinert	30-40					0 bzw. 500
Fallschacht "heiß"	zerkleinert	□ 5	0 bis 114	5 bis 24	900 bis 1100 Schrittweite 50	Eigenleuchten (nach Zündung)	500
	nicht zerkleinert	30-40					500

Versuchsbegleitend wurden Gasspezies- und Temperaturprofile über der Höhe aufgenommen. Da die Kamerakühlsonde zum Zeitpunkt der Heißversuche für den Fallschacht noch nicht verfügbar war, wurden später Versuche im kalten Fallschacht (BRENDA) mit zusätzlicher Beleuchtung zum Test des optischen Messsystems durchgeführt. Dabei wurden die Partikelgrößen und Förderdrücke variiert. In der letzten Versuchskampagne an BRENDA sollte die Lichtfeldkamera die Partikel „von oben“ verfolgen. Diesbezüglich wurde vor die letzte „heiße Fallschacht“-Versuchsreihe die geeignete Optik (Objektiv) für die neue Einbauposition der Kamera (Decke NBK) im Vorfeld ausgewählt und getestet werden. Ebenso wurde die Sichtbarkeit der verschiedenen FLUFF-Fraktionen in den Kamerabildern überprüft. Um festzustellen ob mit der geänderten Kameraposition genauere 3D-Informationen bezüglich die Flugtrajektorien der einzelnen Partikeln möglich sind, wurden kalte Vorversuche (Raumtemperatur) mit Modellfraktionen durchgeführt. Die Modellfraktionen weisen gegenüber den FLUFF eine konstante Form und chemische Zusammensetzung auf. Das macht die CFD-Modellierung und später den Vergleich zwischen berechneten und experimentell aufgenommenen Flugtrajektorien wesentlich leichter.

Partikel aus Holzhackschnitzel, Konfetti, Papierschnipsel (aus geschreddertem Papier), PE-Granulat (Hostalen ACP 9255) und Plastikfolie, sowie aus dem FLUFF aussortierte 3D-Plastik (siehe Abbildung 64) wurden einzeln, manuell durch die FLUFF-Lanze auf der Decke in die Nachbrennkammer eingebracht.

Nach dem reinen Fallschachtbetrieb wurden die Partikel im Gegenstrom von kalter Luft (~ 1000 m_N³/h) angeströmt. Mithilfe von im Inneren der NBK angebrachten Strahlern wurden die Partikel sichtbar und Partikeltrajektorien konnten aufgenommen werden.

Schließlich wurden die „heißen Fallschacht Versuche“ mit den Modelpartikeln durchgeführt. Die Zuführung den verschiedenen Fraktionen erfolgte durch die gerade Lanze L1 auf der Decke der Nachbrennkammer. Einzelnen Partikeln wurden per Hand dosiert (sehr geringer Massenstrom). Der angewendeten Dosiervorgang ermöglicht deutlich genauere Aufnahme der Flugtrajektorien, Flug- und Zündzeiten den unterschiedlichen Materialien. Die Partikelförderung wurde nur mit Hilfe der Schwerkraft, ohne Anwendung von Druckluft realisiert. Der Rauchgasvolumenstrom wurde auf ca. 1400 m_N³/h (das niedrigste mögliche) gehalten. Die Temperatur in NBK (Austritt, gemessen an der Decke) ist ähnlich wie bei den früheren Versuchen von 1100 °C runter bis 900 °C mit Schrittweite von 50 °C geändert worden. Vor dem Zünden wurden die Partikel durch den Kontrastunterschied kaltes Partikel / heiße Wand detektiert. Nach der Zündung resultierte die Detektion maßgeblich Dank des Partikeleigenleuchtens. Für die Aufnahmen von Konzentrationen und Temperatur, neben die Rohgasmessung nach dem Kessel wurde eine zusätzliche Messlanze, seitlich am NBK, über dem Staubbrenner auf ca. 12 m Höhe eingebaut (siehe Abbildung 69).

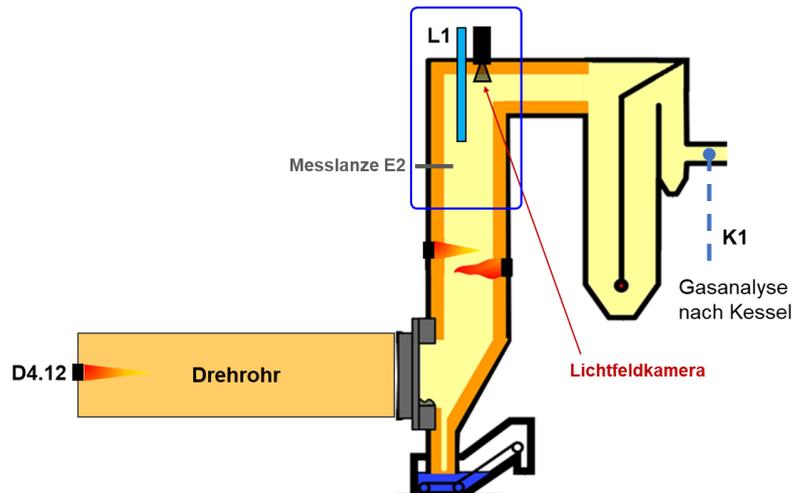


Abbildung 69. Anordnung FLUFF-Lanze, Kamera und Mess-Lanze bei den "heißen Fallschacht"-Versuchen mit Modellfraktionen.

Die Nachbrennkammer ist 9 m hoch und hat einen Innenradius von 1,75 m. Die Brennstoffpartikel werden manuell über eine lageverstellbare Lanze oben, die einen Durchmesser von 40 mm hat, in die Kammer eingeblasen. Anders als die Versuche im Drehrohrföfen ist die Lichtfeldkamera direkt oben im Inneren des Fallschachtes installiert, der über 900 °C beheizt werden kann. Daher ist die Kamera in einer wassergekühlten Kühlsonde montiert, deren Echtzeittemperatur von Thermoelementen gemessen wird, wie in Abbildung 70 dargestellt. Die Höhenposition der Lanze wird angepasst, bis sie von der Kamera sichtbar ist. Die Brennweite des genutzten Objektiv betrug 35 mm. Für jeden Versuch wurde eine Sequenz von etwa 3000 Frames aufgenommen, was einem Zeitraum von etwa 9 s entspricht. Abbildung 71 gibt ein Beispiel von Aufnahmen in dem Fallschacht.



Abbildung 70. Bilder von den in der Brennkammer durchgeführten Experimenten. Die Lichtfeldkamera wird durch eine Kühlsonde gekühlt. Die oben in der Brennkammer installierte Sonde ist mit einem gelben gestrichelten Rechteck gekennzeichnet. Die aktuelle Temperatur innerhalb der Kühlsonde wird durch das Thermoelement auf der linken Seite gemessen und angezeigt. Eine höhenverstellbare Lanze ist markiert mit einem rot gestrichelten Rechteck.

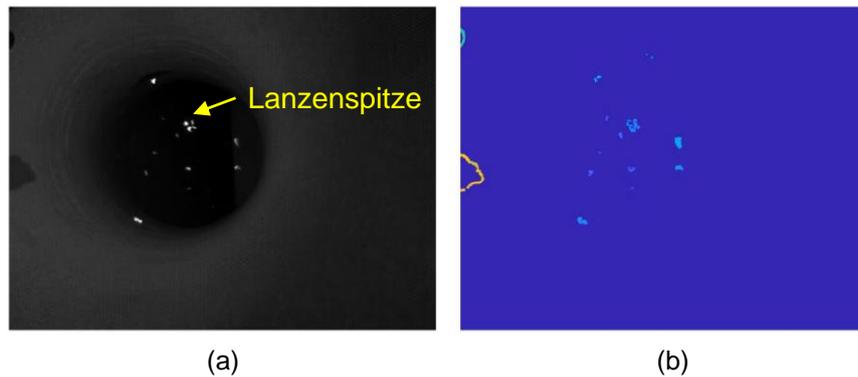


Abbildung 71. Beispiel für ein aufgenommenes Bild im Fallschacht. (a): Gesamtaufnahme. Das Bild entspricht in etwa dem von einer herkömmlichen Kamera aufgenommenen Bild. (b): Tiefenkarte. Die Tiefeninformation wird als Falschfarbenbild dargestellt.

Es wurde in Fallschacht folgende Versuche durchgeführt:

1. 2019 KW 41, kalt
2. 2020 KW 7, heiß
3. 2021 KW7, kalt
4. 2021 KW30, heiß

Erzielte Ergebnisse

Bei den Versuchen mit dem nicht zerkleinerten FLUFF wurde die Lanze L1, unabhängig vom Förderluftdruck nach der Zuführung weniger Partikel wiederholt verstopft. Da die Partikelgröße fast identisch mit dem Innendurchmesser der Lanze ist, wurde dieses Ergebnis erwartet. Partikeltrajektorien von zerkleinerten FLUFF wurden während die Experimente ohne Förderluft sowie mit Förderluftdruck von 0,5 (~ 5 m/s) und 1,0 bar(g) (~ 8 m/s) aufgezeichnet. Bei höheren Förderdrücken fliegen die FLUFF-Partikeln zu schnell an der Kamera vorbei und verhinderten somit die Aufzeichnungen ihrer Flugbahnen. Die mit dem optischen Messsystem aufgenommenen Sequenzen der Kaltversuche zeigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit des entwickelten Messsystems. Obwohl die Kamera Position nicht optimal war haben die durchgeführten Heißversuche gezeigt, dass die prinzipielle Funktionsfähigkeit des entwickelten Messsystems gegeben ist. Allerdings sind im Sichtbereich der Kamera die Partikel nur sehr kurz zu sehen und ein Großteil der Partikel landet in diesem Bereich an der Wand. Für die letzte Messkampagne sollte daher die Position der Kamera geändert werden. Die Kamera wurde neben der Lanze angebracht und verfolgte damit das Partikel von oben. Mit Hilfe der mit Modellfraktionen durchgeführten Vorversuche wurde die Partikelverfolgung von oben realisiert. Die Sichtbarkeit der verschiedenen Fraktionen in den Kamerabildern wurde überprüft. Die entsprechende Dosierung von möglichst einzelnen Partikeln in den Brennraum (NBK) wurde getestet. Die mit der Messlanze L2 und nach dem Kessel gemessenen O₂-, CO₂-, CO-, NO_x- H₂O-Konzentrationen und Temperatur sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Die Zunahme der O₂-Konzentration von der Ebene E2 bis zum Kessel K1 resultiert aus der Falschluff, die durch die Fluff-Dosierlanze (siehe Abbildung 69) eingesaugt wird. Entsprechend verdünnt sich die CO₂- Konzentration 8,16 Vol.-% auf 4,63 Vol.-%.

Die durchgeführten Heißversuche zeigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit des entwickelten Messsystems. Mit Hilfe der mit Modellfraktionen durchgeführten Vorversuche wurde die Partikelverfolgung von oben realisiert. Die Sichtbarkeit der verschiedenen Fraktionen in den Kamerabildern wurde überprüft. Die entsprechende Dosierung von möglichst einzelnen Partikeln in den Brennraum wurde getestet.

Tabelle 14. Konzentrationen und Temperatur bei "heißen Fallschacht"-Versuchen mit Modelpartikeln.

Parameter	Messlanze E2 (NBK, 12m)	Rohgas nach Kessel (K1)
Konzentration O ₂	6,40 Vol. % tr.	12,87 Vol. % tr.
Konzentration CO	311 mg/m ³ _N	□
Konzentration CO ₂	8,16 Vol. % tr.	4,63 Vol. % tr.
Konzentration H ₂ O	□	6,68 Vol.% f.
Temperatur	999°C	□

Die Ergebnisse der Partikelverfolgung in dem Fallschacht werden im Folgenden dargestellt. Die Brennstoffpartikel wurden zunächst detektiert und danach getrackt. Da die Performance der Partikeldetektion in Arbeitspaket 6 ausführlich beschrieben wurde, werden hier nur die erhaltenen Trajektorien dargestellt. Zuerst sind die optische Ground Truths von verschiedenen Brennstofffraktionen darzustellen in Abbildung 72 darzustellen. Mithilfe der in Arbeitspaket 6 beschriebenen Detektions- und Verfolgungsmethoden wurden die Flugbahnen der verschiedenen Fraktionen von Ersatzbrennstoffen in dem Fallschacht erhalten und sie zusammen mit den optischen Ground Truths in Abbildung 73 dargestellt. Hier werden nur die Flugbahnen der Partikel gezeigt, die aus der Lanze kommen.

Wie aus der Abbildung 72(a) ersichtlich ist, sind die Folien nur in der Nähe der Lanze sichtbar und bleiben für eine Weile unsichtbar, bevor sie verbrennen und von der Kamera weiter erfasst werden, was die Detektion der Partikel stark erschwert. Es ist daher schwierig, die vollständigen Flugbahnen von der Lanze bis zum Ende der Verbrennung zu erhalten, was die Möglichkeit einer späteren Analyse des Flug- und Verbrennungsverhaltens dieser Fraktion einschränkt. In Bezug auf die Anzahl der erhaltenen Spuren führt das Tracking von Papierschnipsel (Abbildung 72(b)) zu besseren Ergebnissen als das Tracking von Folien. Im Vergleich zu Folien sind die Papierschnipsel leicht zu erkennen, da sie früher brennen und somit eine kürzere unsichtbare Phase haben. Jedoch aufgrund der Größe und der langen Brenndauer der Papierschnipsel verdecken die brennenden Partikel andere nicht brennende Partikel, was zu ungenauen Detektionsergebnissen und damit zu später ungenauen Flugbahnen führt. Die Konfettis im Fallschacht (Abbildung 72(c)) sind wegen ihrer geringen Größe vor dem Zünden mit der Lichtfeldkamera nur schwer zu erfassen. Aufgrund der kurzen Brenndauer ergeben sich nur sehr kurze, kaum nutzbare Trajektorien während der Brennphase. PE-Granulate (Abbildung 72(d)) sind noch kleiner und transparenter als Konfetti, sodass die Reflektion nicht ausreicht, um sie vor dem Zünden mit der Kamera zu erfassen. Zudem zündet diese Fraktion nicht gut und lässt sich auch in der optischen Ground Truth nur schwer erkennen. Daher können die PE-Granulate durch die Detektionsansätze kaum entdeckt werden, was das Tracking verhindert. Ähnlich wie bei PE-Granulate zünden die meisten Holzhackschnitzel (Abbildung 72(e)) nicht. Jedoch sind Holzhackschnitzel etwas größer und undurchsichtiger als PE-Granulate, sodass sie vor der Zündung nach dem Einbringen durch die Lanze noch für eine kurze Weile im Kamerabild erkennbar sind. Diese sichtbaren Partikel werden mit der Detektionsmethode nachgewiesen. Allerdings sind die Partikel meist nicht durchgängig sichtbar, was die Partikeldetektion analog zu den Folien negativ beeinflusst. Deswegen ist es schwierig, vollständige Flugbahnen von Holzhackschnitzel zu erhalten und deren Flug und Abbrandverhalten im Fallschacht zu analysieren. Daraus folgt, dass es schwierig ist, verschiedene Ersatzbrennstoffe mit den vorhandenen Versuchsgeräten im heißen Fallschacht zu erkennen und zu verfolgen. Einige

Fractionen sind nur zu Beginn und erst wieder nach der Zündung sichtbar, wie z.B. Folie, Papierschnipsel und Holzhackschnitzel. Konfetti lässt sich nur während der Verbrennung erfassen. PE- Granulat ist überall im Fallschacht schwer zu sehen. Infolgedessen kann die Detektionsmethode für den Fallschacht keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern, und das Tracking kann nicht durchgeführt werden. Die detaillierte Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens im heißen Fallschacht ist daher ebenfalls nicht möglich.

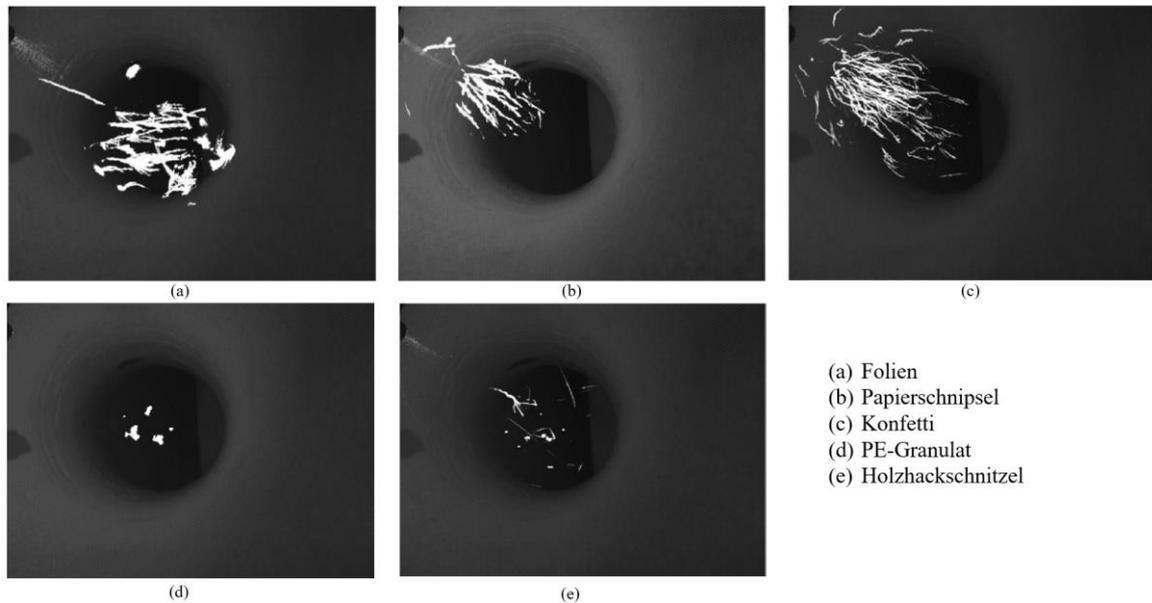


Abbildung 72. Beispiele für optische Ground Truths von verschiedenen Fraktionen der Ersatzbrennstoffe im Fallschacht. (a): Folie. (b) Papierschnipsel. (c) Konfetti. (d) PE-Granulat. (e) Holzhackschnitzel.

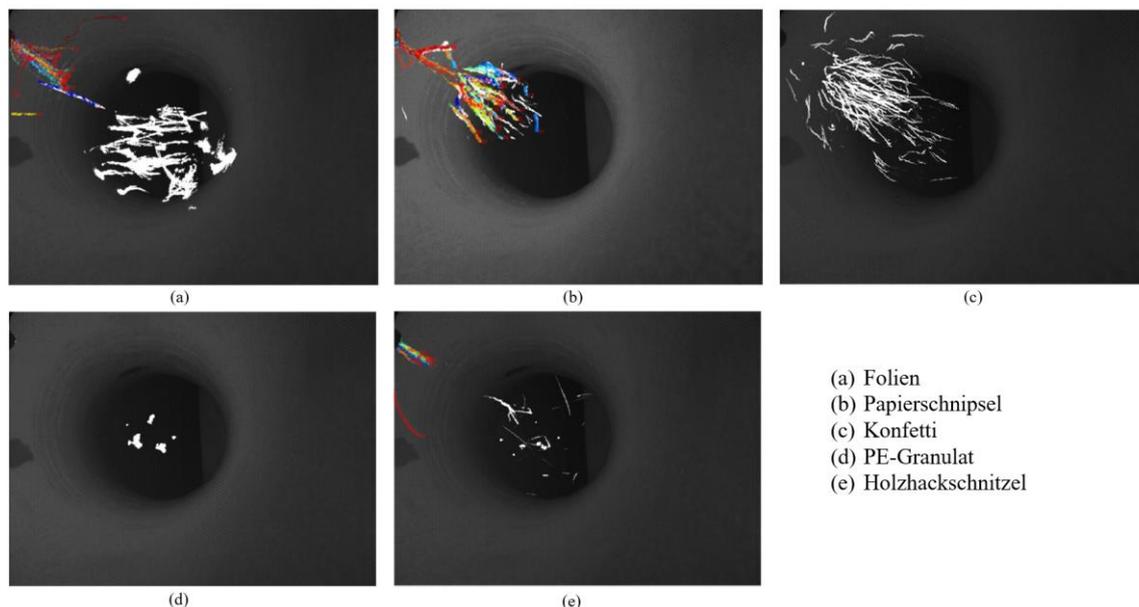


Abbildung 73. Tracking-by-Detection Ergebnisse von verschiedenen Fraktionen der Ersatzbrennstoffe im Fallschacht. (a): Folie. (b) Papierschnipsel. (c) Konfetti. (d) PE-Granulat. (e) Holzhackschnitzel.

2.9 AP8: Simulation der heißen Fallschachtversuche und Modellabgleich (FS1, 3 PM)

In diesem Arbeitspaket sollten die heißen Fallschachtversuche (siehe Kapitel 2.8) nachgerechnet werden. Aufgrund der in Kapitel 2.8 beschriebenen Probleme hinsichtlich des Partikel-Trackings, wurde entschieden, sich auf die deutlich besser auszuwertenden Drehrohrversuche zu konzentrieren. Aus diesem Grund wurde das Arbeitspaket, in Absprache mit dem PA, durch entsprechend erweiterte Untersuchungen im AP9 (Kapitel 2.10) ersetzt.

2.10 AP9: Verbrennungsversuche in einem halbtechnischen Drehrohr (FS2, 7 PM, FS3, 6,5 PM)

Durchgeführte Arbeiten

Die ersten Verbrennungsversuche im Drehrohr (DRO) wurden mit unzerkleinertem sowie mit zerkleinertem FLUFF durchgeführt. Der zur Aufzeichnung der Trajektorien benötigte geringe Massenstrom (wenige Partikel) wurde durch manuelle Materialzuführung in die Lanze L2 erreicht. Ähnlich wie bei den Fallschachtversuchen wurde der FLUFF pneumatisch, mittels Druckluft durch die Lanze gefördert. Um die optimale Partikelaxialgeschwindigkeit zu finden, wurde die Förderluft schrittweise von 0,5 bar (g) (4,0 m/s) bis 5 bar(g) (16 m/s) um 0,5 bar erhöht. Um die FLUFF-Zündung sicherzustellen, wurde das Drehrohr mithilfe der Brenner an der Stirnseite bis auf ca. 1250 °C aufgeheizt. Da bei laufendem Brenner eine Unterscheidung zwischen Flamme und brennenden FLUFF-Partikeln nicht möglich war, wurde der Brenner für die Zeit der Kameraaufnahmen wieder außer Betrieb genommen. Die Gesamtanlage wurde mit Hilfe der Brenner in der Nachbrennkammer warmgehalten. Mit dem entwickelten optischen Messsystem wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Verbrennungsverhaltens der Partikel für systematisch variierende Förderluftgeschwindigkeiten in einer mehrtägigen Messkampagne durchgeführt. Zudem wurden mit einem zusätzlichen Infrarot-Kamerasystem die Innenwandtemperaturprofile des Drehrohrs während der Versuche messtechnisch erfasst, um Daten für die Modellierung zu gewinnen.

Auch am Drehrohr sind zuerst Vorversuche mit den Modellfraktionen durchgeführt worden. Das Ziel war, wie bei den Fallschachtversuchen, die Sichtbarkeit der verschiedenen Fraktionen mit Hilfe der Kamera zu überprüfen sowie Erfahrungen bezüglich der Dosierung (möglichst einzelnen Partikeln, mit konstantem Dosierintervall) zu sammeln. Um die Längenzuordnung zu verbessern, wurden im Drehrohr in den Kaltversuchen Plastikkegel im Abstand von 1 m aufgestellt.

Diese Kegel dienen als Referenz für die Lichtfeldkamera bei der Bestimmung der Länge der Flugbahnen der einzelnen Fraktionen. Einzelnen Partikeln wurden manuell dosiert und mithilfe von Förderluft (4 bar) durch die FLUFF-Lanze am Stirnseite ins Drehrohr eingebracht. Alle Vorversuche fanden bei Raumtemperatur statt. Der Unterdruck im DRO wurde auf 0,3 mbar eingestellt. Um die Sichtbarkeit der Partikeln zu gewährleisten, wurde das Innere des Ofens entsprechend ausgeleuchtet.

In der Heißkampagne wurden einzelne Partikel manuell über die L-förmige Lanze L2 an der Stirnseite ins Drehrohr eingeführt. Die Partikel wurden mittels Druckluft von 4,0 bar (68,6 m³/h), 4,5 bar (70,5 m³/h) und 5 bar (76,6 m³/h) ins DRO gefördert. Der Rauchgasvolumenstrom wurde gering, auf ca. 1400 m_N³/h eingestellt. Die Drehgeschwindigkeit des Ofens war auf 0,2 upm eingestellt worden, bei einer Drehrohrneigung von 2 °.

Die Partikel wurden vor dem Zünden durch den Kontrast „kaltes Partikel/heiße Wand“ detektiert sowie durch die Partikeleigenleuchten nach der Zündung. Die Gaskonzentrationen wurden mithilfe von einer Messlanze, die an der DRO-Stirnseite (siehe Abbildung 74) eingebaut war, aufgenommen.

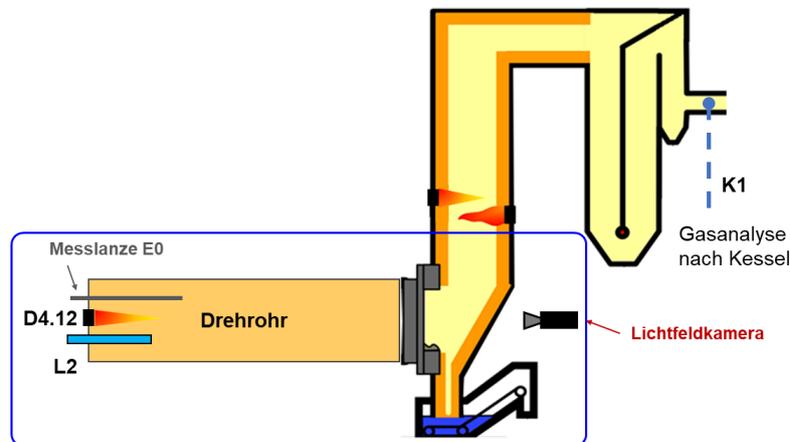


Abbildung 74. Anordnung FLUFF-Lanze, Kamera und Mess-Lanze bei den Verbrennungsversuchen am Drehrohr mit Modellfraktionen.

Die genutzte Lichtfeldkamera wird außerhalb des Drehrohrs montiert, um die Partikelbewegungen durch ein Quarzglas-Fenster am Ausgang des Ofens zu beobachten, wie in Abbildung 75 dargestellt. Zusätzlich wurde mit einer Infrarot-Feuerraumkamera mit wassergekühlter und luftgespülter Sonde bei einer Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ die Temperaturverteilung im Inneren des Ofens gemessen. Außerdem ist neben der Lichtfeldkamera eine zusätzliche konventionelle Kamera zur Überwachung der Betriebsbedingungen des Ofens verbaut. Die Brennweite des genutzten Objektivs der Lichtfeldkamera betrug 85 mm. Für jeden Versuch wurde eine Sequenz von etwa 3000 Frames aufgenommen, was einem Zeitraum von etwa 9 s entspricht.

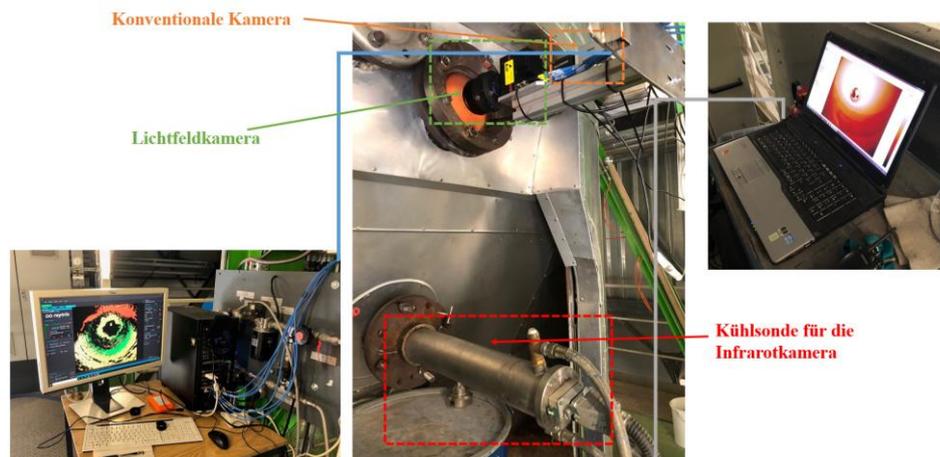
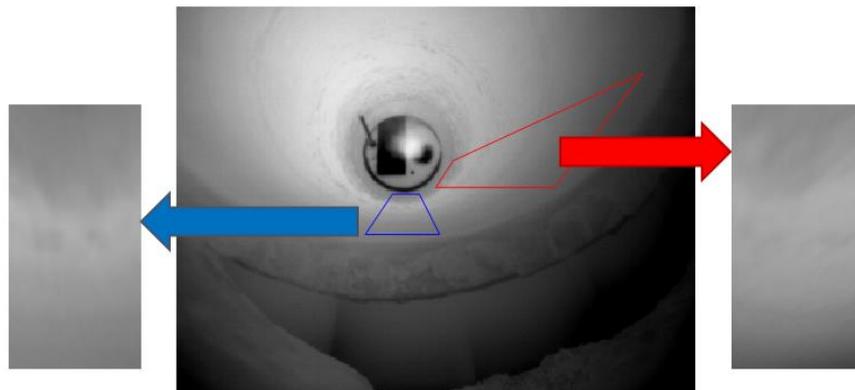


Abbildung 75. Bilder der im Drehrohrföfen durchgeführten Versuche. Die außerhalb des Ofens montierte Lichtfeldkamera, die durch das grün gestrichelte Rechteck markiert ist, wird vom Computer links über das Kabel ausgelöst. Ein durch eine Kühlsonde gekühlter Infrarotsensor ist durch ein rot gestricheltes Rechteck gekennzeichnet. Der Sensor wird über den Laptop auf der rechten Seite gesteuert. Neben der Lichtfeldkamera ist eine konventionelle Kamera (orange gestrichelt) installiert, mit der die Technologen den Verbrennungsprozess im Inneren des Ofens zu überwachen.

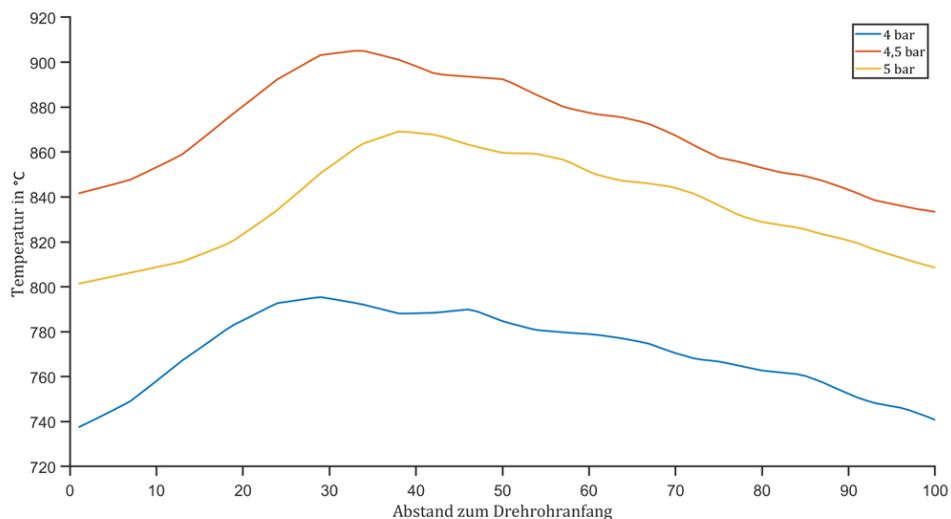
Die IR-Kameramessung am Drehrohrende ermöglicht die Bestimmung des Temperaturprofils an der Drehrohrinnenwand. Ein aus der Kameraperspektive trapezförmiger Bildbereich wird definiert, der durch eine geometrische Transformation in ein entzerrtes Rechteck überführt werden kann, wie in der Abbildung 76(a) dargestellt. Dies ermöglicht die Extraktion der Temperaturen entlang der Drehrohrachse durch die Bestimmung der mittleren Temperatur in jeder Bildzeile des Rechteckes. Dadurch kann das Temperaturprofil an der Drehrohrinnenwand ausgegeben werden, wie in der Abbildung 76(b) (c) angezeigt. Der Abstand zum Drehrohranfang ist hierbei in Pixelkoordinaten (y-Koordinate) des entzerrten Rechtecks angegeben. Da das Drehrohr im Laufe der Versuche immer wieder abgekühlt wurde, variierte die Temperatur in den Versuchen mit verschiedenen Förderdrücken. Die Temperatur beim Versuch mit 4,5 bar Förderdruck war am höchsten, während die Temperatur beim Versuch mit 4 bar Förderdruck etwa 100 °C niedriger als die beim Versuch mit 4,5 bar Förderdruck. Deswegen sind ungebrannte Partikel in den Versuchen mit 4 bar Förderdruck nur schwer zu erkennen.

Es wurden im Drehrohr folgende Versuche durchgeführt:

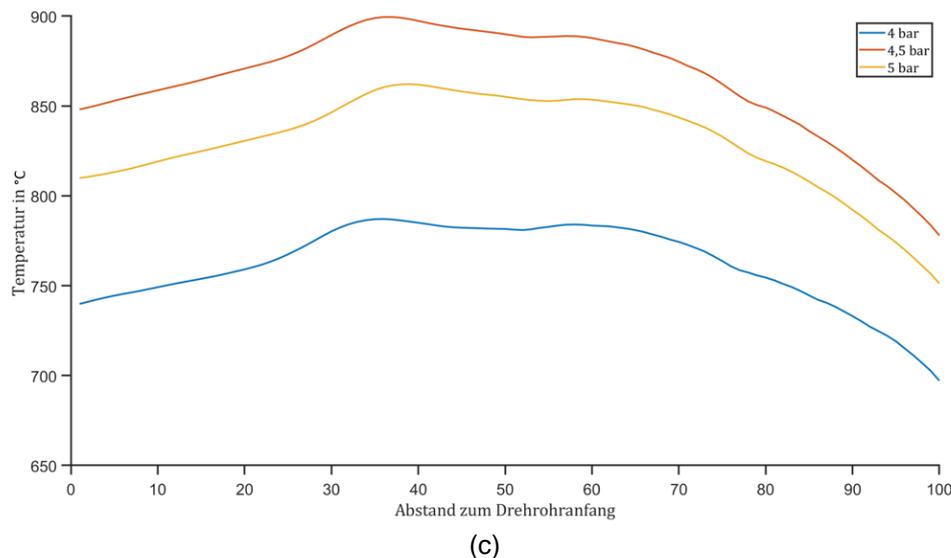
1. 2019 KW 28 &29, heiß
2. 2020 KW 7, heiß
3. 2021 KW7, kalt
4. 2021 KW30, heiß



(a)



(b)



(c)
Abbildung 76. Definierter trapezförmiger Bildbereich und Temperaturprofil an der Drehrohrinnenwand. (a) definierter trapezförmiger Bildbereich. (b) Temperaturprofil von dem blauen Trapez. (c) Temperaturprofil von dem roten Trapez.

Erzielte Ergebnisse

Während der ersten Versuchsreihe wurden Flugtrajektorien von brennenden FLUFF-Partikeln bei Förderluftdrücken von 4 (~14,5 m/s), 4,5 (~15 m/s) und 5 bar(g) (~16 m/s) aufgezeichnet. Bei einem Luftdruck < 4 bar (g) bleiben die Partikel im Inneren der Lanze hängen. Im Gegensatz zu dem Fallschacht konnten beide Materialformen (zerkleinert und nicht zerkleinert) durch die Lanze L2 gefördert werden (die L2-Lanze ist kürzer als die Lanze L1 und hat damit weniger Strömungsdruckverlust). Die Messung von Temperatur- und Konzentrationsprofilen am Drehrohrende ist nur sinnvoll für eine FLUFF-Förderung mit mindestens 20-30 kg/h, um deutliche Konzentrationen an Verbrennungsprodukten im Abgas zu detektieren.

Durch die ersten Heißversuche konnte nachgewiesen werden, dass das neu entwickelte optische Messsystem die Beobachtung der brennenden Partikel im Drehrohr ermöglicht. Es können sowohl ungezündete als auch gezündete Partikel detektiert und eine Tiefeninformation abgeleitet werden. In die letzte Messkampagne sollten fraktionsspezifische Daten des FLUFF erfasst werden. Dementsprechend wurden unterschiedliche Fraktionen individuell in das Drehrohr eingebracht und das Flugverhalten gemessen.

Mithilfe von durchgeführten Vorversuche im kalten Zustand wurden wertvolle Erfahrungen bezüglich der Dosierung und der Sichtbarkeit der verschiedenen Fraktionen in den Kamerabildern, sowie wichtige Informationen hinsichtlich optimale Einstellungen des optischen Messsystems gesammelt. Diese Arbeiten waren die Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung von der letzten Versuchskampagne.

An der Drehrohraußenwand sind standardmäßig 3 Thermometer angebracht (siehe Abbildung 77). Die Unterbrechungen in die Temperaturverläufe bedeuten, dass in den entsprechenden Zeitfenstern keine Messungen durchgeführt worden sind.

Die Unterschiede zwischen die Außenwandtemperaturen entlang des Drehrohres hängen mit der Ausbrandzone der Flamme zusammen. Durch den Betrieb des Brenners D4.12 an der DRO-Stirnseite mit Heizöl befindet sich die Ausbrandzone auf der Höhe der Temperaturmessung T2 (grün), die etwa 30 °C höher ist als T3 (rot). Die mit der Messlanze E0 ermittelten Konzentrationen und Temperatur sind in der Tabelle 15 aufgelistet.

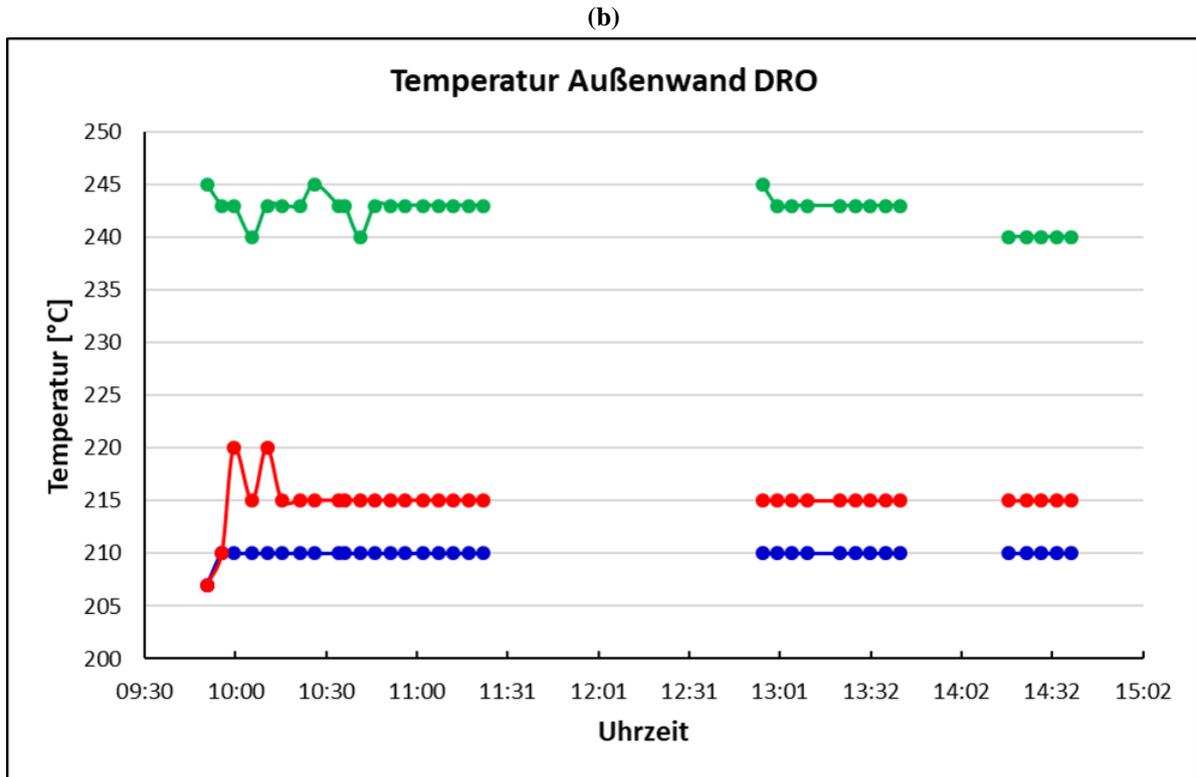
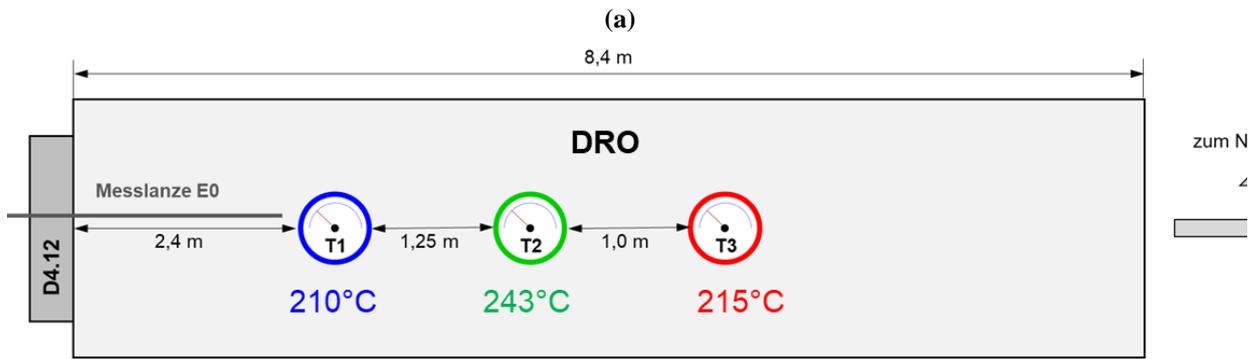


Abbildung 77. Anordnung Thermometer Außenwand DRO (a). Temperaturen Außenwand Drehrohr während der Versuche (ermittelt analog) (b)

Tabelle 15. Konzentrationen und Temperatur bei den Verbrennungsversuchen am Drehrohr mit Modellfraktionen gemessen beim Betrieb mit Ölbrenner D4.12 (DRO-Strinseite).

Parameter	Messlanze E0 (Stirnseite DRO)
Konzentration O ₂	9,43 Vol. %
Konzentration CO	1,11mg/m _N ³
Konzentration CO ₂	7,42 Vol. %
Temperatur	1078°C

Der Wärmeverlust über das Drehrohr kann mithilfe einer Wärmedurchgangsberechnung über die Ausmauerungsdaten ermittelt werden. Das Drehrohr wird als Zylinder betrachtet.

Um die Rauchgastemperatur in axialer Richtung im Drehrohr abschätzen zu können, wurde an den Stellen der Außenwandtemperaturmessung der Wärmedurchgang berechnet. Das Drehrohr mit den einzelnen Ausmauerungsstärken sind in Abbildung 78 schematisch dargestellt.

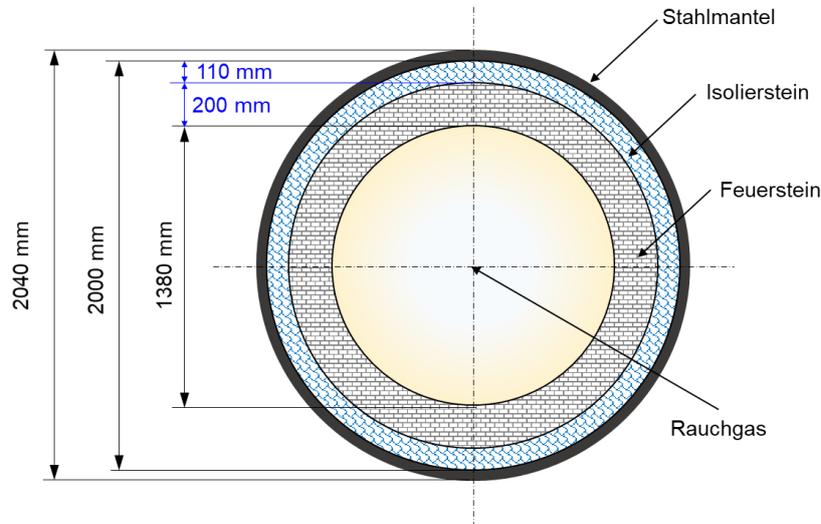


Abbildung 78. Schnitt durch das Drehrohr mit den Abmaßen der einzelnen Ausmauerungsmaterialien.

Anhand der über den Wärmedurchgang berechneten Wärmeverluste lassen sich die einzelnen Oberflächentemperaturen zwischen den Ausmauerungsmaterialien berechnen. Die entsprechenden Temperaturen sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16. Ausmauerungsoberflächentemperaturen, aus dem Wärmedurchgang ermittelt.

Ausmauerungsmaterial	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Stahlmantel außen	210 (gemessen)	243 (gemessen)	215 (gemessen)
Stahlmantel innen	212	245	217
Isolierstein innen	668,1	701,1	673
Feuerstein innen	1069	1102	1074
Rauchgas	1137	1170	1142

Die mit der Messlanze E0 gemessene Rauchgastemperatur von 1078 °C zeigt eine gute Übereinstimmung mit den rechnerisch ermittelten Wert bei T1. Nach der Einführung durch die Drehrohrstirnseite liegt die Messöffnung der Messlanze E0 mit dem Thermoelement in der Höhe der Position des Außenwandthermometers T1 (siehe Abbildung 77).

Neben der messtechnischen Erfassung der Wurfweiten einzelner Partikel, können die Wurfweiten auch über einfache Wurfparabel-Berechnungen abgeschätzt werden. Die theoretischen Flugweiten idealer FLUFF-Partikel wurden unter Berücksichtigung der Geometrie des Drehrohres (Neigungswinkel, Innendurchmesser, Position FLUFF-Lanze) bei den verschiedenen Stärken des Förderdrucklufts berechnet (siehe Abbildung 79). Den Einfluss des Rauchgaswiderstands wurde dabei vernachlässigt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

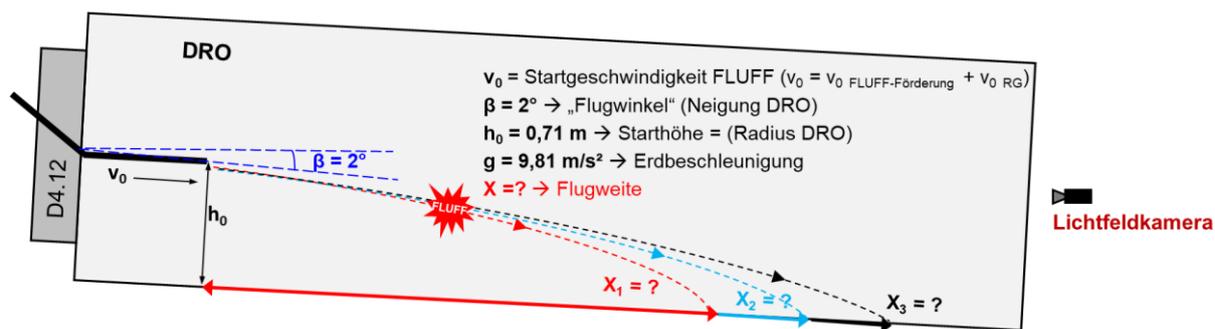


Abbildung 79. Berechnungsschema Flugweiten eines idealen FLUFF-Partikels.

Tabelle 17. Berechnete theoretische Flugweiten eines idealen FLUFF-Partikels.

Förderdruckluft FLUFF [bar]	Flugweite X ₁ [m]	Flugweite X ₂ [m]	Flugweite X ₃ [m]
4,0	6,89	□	□
4,5	□	4,11	□
5,0	□	□	7,57

Die berechneten Flugweiten sind 2- bis 3-mal länger als die experimentelle Werte für die verschiedenen Fraktionen ermittelt durch die space-sliced Tiefengeschwindigkeiten (siehe Kapitel 2.11). Hier liegen die Wurfweiten eher bei 1-2 m für Papierschnipsel oder bei 2-3 m für PE-Granulat. Der Grund hierfür ist die Vernachlässigung des Luftwiderstandes durch die Partikelform bei der Berechnung.

Durch die Heißversuche im Drehrohr konnte nachgewiesen werden, dass das neu entwickelte optische Messsystem die Beobachtung ungezündeter und gezündeter Partikel sowie die Erfassung der zugehörigen Tiefeninformation ermöglicht. Unterschiedliche Fraktionen wurden individuell in den Drehrohröfen eingebracht, um das brennstoffspezifische Verhalten zu analysieren. Außerdem wurde der Förderdruck in drei Stufen (mit 4 bar, 4,5 bar und 5 bar) zur Untersuchung des Flug- und Abbrandverhaltens unter Berücksichtigung dieses Einflussfaktors variiert. Die Vorgehensweise von Partikel-Tracking-by-Detection im Drehrohr ist gleich wie im Fallschacht. Hier werden die Ergebnisse mit verschiedenen Druckeinstellungen separat dargestellt. Für jeden Brennstoff und jede Druckeinstellung wurden zwei Sequenzen mit etwa 3000 Frames aufgenommen.

Die Folien brannten nach der Landung auf der Drehrohrinnenwand lange stark rauchend nach, was die Sichtbedingungen bei nachfolgenden Versuchen teilweise beeinträchtigte. Außerdem sind die Folien so transparent, dass sie von der Kamera im ungezündeten Zustand nicht mit genügender Sichtbarkeit erfasst werden können. Daher wurden die Folien nach Abschluss von Vorversuchen bei den Experimenten im Drehrohr ausgeschlossen und nur die übrigen vier Fraktionen getestet. Die Experimente mit Holzhackschnitzeln, Papierschnipseln und Konfetti wurden mit einer Framerate von 330 fps aufgenommen, während die Experimente mit PE-Granulat nur mit einer Framerate von 153 fps durchgeführt wurden. PE-Granulate brauchen wegen der geringen Größen und niedrigen Helligkeit relativ lange Belichtungszeiten, was die mögliche Framerate einschränkt.

Ergebnisse bei Förderdruck 4 bar

Zu Beginn wurde die optische Ground Truth von den Fraktionen über die gesamte entsprechende Sequenz erzeugt, um einen Gesamtüberblick zu erhalten, wie in Abbildung 80 dargestellt. Offenbar zünden Papierschnipsel und Konfetti bereits wie gewünscht im dem Flug, während PE-Granulat und Holzhackschnitzel unter den Versuchsbedingungen nur selten zünden. Aufgrund der niedrigeren Innenwandtemperaturen des Drehrohrs bei den Experimenten mit 4 bar Förderluftdruck und der damit geringen Beleuchtung des Drehrohrinneren können ungezündete Partikel nicht ausreichend gut von der Kamera erfasst werden. Daher ist es schwierig, PE-Granulat und Holzhackschnitzel zuverlässig zu detektieren um darauf aufbauend deren Flugbahnen zu erhalten. Obwohl Papierschnipsel und Konfetti nach der Verbrennung nachgewiesen werden können, ist es aufgrund der fehlenden Detektionen vor der Verbrennung nur unzureichend möglich, vollständige Spuren für spätere Untersuchungen zu erhalten. Daher sind keine zuverlässigen experimentellen Schlussfolgerungen aus den Experimenten mit 4 bar Förderdruck zu ziehen.

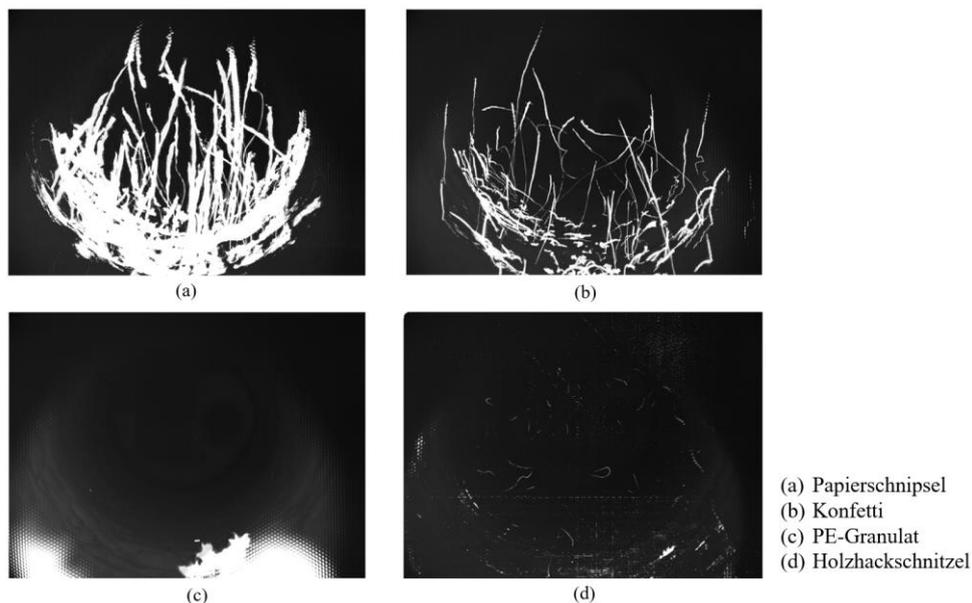


Abbildung 80. Optische Ground Truth von verschiedenen Fraktionen der Ersatzbrennstoffe im Drehrohr bei 4 bar Förderdruck. (a) Papierschnipsel. (b) Konfetti. (c) PE-Granulat. (d) Holzhackschnitzel.

Ergebnisse bei Förderdruck 4,5 bar

Abbildung 81 zeigt die optischen Ground Truths für die Fraktionen bei den Experimenten mit 4,5 bar Förderdruck. Analog zu den Experimenten mit bei 4 bar Förderdruck zünden nur Papierschnipsel und Konfetti im Flug. Dank höherer Temperaturen im Drehrohr (als bei den Experimenten mit 4 bar) ergibt sich durch die heißere Drehrohrinnenwand eine bessere Beleuchtungssituation und auch ungezündete Partikel lassen sich durch die Kamera erfassen, was eine zuverlässige Grundlage für Partikeldetektion und -tracking darstellt. Bevor die Ergebnisse von Tracking-by-detection präsentiert werden, lassen sich kurz die Bewegungen der verschiedenen Partikel anhand der optischen Ground Truths analysieren. Da – bei gleicher Framerate - die Abstände zwischen zwei hellen Holzschnitzeldetektionen deutlich größer als bei den anderen Fraktionen sind, kann man von einer hohen Geschwindigkeit der Fraktion ausgehen. Viele Papierschnipsel haben eine erhebliche Bewegung in x-Richtung und erreichen die Seitenwand des Drehrohrofens, bevor sie auf den Boden fallen.

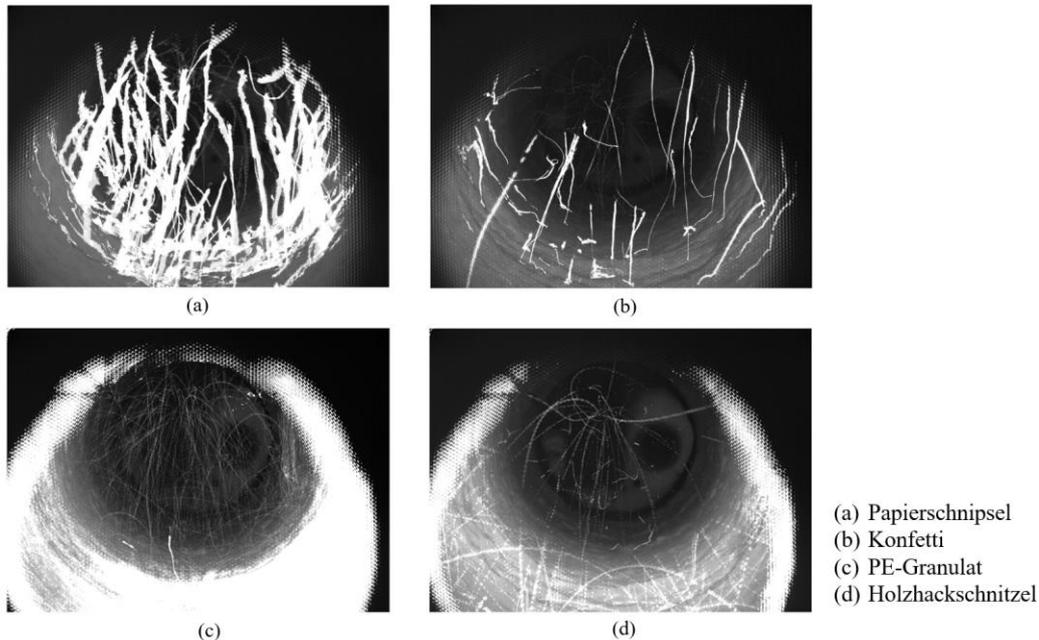


Abbildung 81. Optische Ground Truth von verschiedenen Fraktionen der Ersatzbrennstoffe im Drehrohr bei 4,5 bar Förderdruck. (a) Papierschnipsel. (b) Konfetti. (c) PE-Granulat. (d) Holz hackschnitzel.

Die Ergebnisse der verschiedenen Fraktionen werden nachfolgend getrennt dargestellt, wobei die 2D-Spuren, die konvertierten und genäherten 3D-Spuren und die entsprechenden 3D-Grauwert-Spuren enthalten sind. Es wurden jeweils beide Aufnahmesequenzen für jede Fraktion und jede Förderdruckeinstellung ausgewertet. Hier wird jeweils nur ein Ergebnis präsentiert. Abbildung 82 - Abbildung 85 stellen die erhaltenen Trajektorien der jeweiligen Fraktion dar. Wie aus der Abbildung 81(a) ersichtlich ist, können die einzelnen Trajektorien wegen der übermäßigen Anzahl von Partikeln und ihrer Zündbarkeiten nicht optisch unterschieden werden. Deswegen werden bei den Experimenten mit Papierschnipsel nur 500 Frames in den Ergebnissen angezeigt, um die Spuren optisch klar unterscheiden zu können.

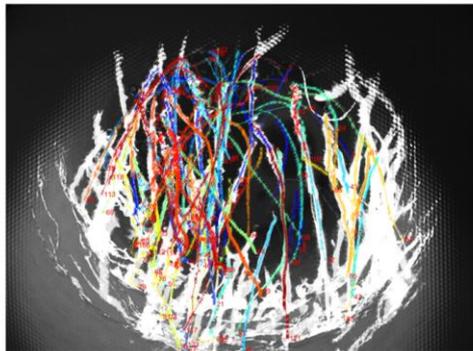
Abbildung 82 zeigt das Tracking und Regressionsergebnis für die Papierschnipsel über 500 Frames. Links dargestellt sind die 2D-Spuren, die auf der entsprechenden optischen Ground Truth gezeigt werden. Rechts oben sind die transformierten 3D-Spuren und rechts unten die entsprechenden Grauwert-Spuren zu sehen. Das Layout der nächsten drei Abbildungen für die anderen drei Fraktionen ist das gleiche wie bei Abbildung 82. Das Papierschnipsel hat eine große Anströmfläche und eine gleichmäßige Massenverteilung, so dass seine Bewegung weitgehend vom Strömungswiderstand beeinflusst wird. Außerdem wird der Flug eines Papierschnipsels aufgrund seiner größeren Abmaße gegenüber den anderen drei Fraktionen auch von einer ausgeprägten Taumel-Bewegung begleitet. Wenn mehrere Papierschnipsel gemeinsam aus der Lanze eingebracht werden, ist es wahrscheinlich, dass sich ihre Bahnen kreuzen. Nach der Zündung vergrößert sich die detektierte Fläche eines Papierschnipsels im Kamerabild, was sich auch auf die Detektion anderer Papierschnipsel auswirkt. Infolgedessen erscheinen die Bahnen der Papierschnipsel ungeordnet und unregelmäßig. Dennoch ist es aufgrund der großen Anzahl von Partikeln möglich, einige vollständigen Flugbahnen für die anschließende Analyse des Flugverhaltens zu erhalten. Aus den Grauwert-Trajektorien ist ersichtlich, dass einige der Trajektorien schlagartige Änderungen der Grauwerte aufweisen, d. h. die Partikel zünden im Flug. Dies bildet auch die Grundlage für die anschließende Untersuchung des Abbrandverhaltens. Es

ist wichtig zu beachten, dass das aufgenommene Bild in den Randbereichen eine Art Gitter- bzw. Wabenstruktur aufweist. Die verwendete Lichtfeldkamera ist nicht in der Lage, nutzbare 3D-Informationen innerhalb dieser Bereiche zu liefern. Daher können einige der vertikal aufsteigenden Verbrennungspartikel nicht vollständig verfolgt und ihr Flug- und Abbrandverhalten damit nicht analysiert werden.

Abbildung 83 zeigt die Tracking- und Regressionsergebnisse von Konfetti über 3126 Frames. Obwohl es sich um dasselbe Material wie Papierschnipsel handelt, scheinen Konfettipartikel im Vergleich zu Papierschnipseln viel gleichmäßigere Flugbahnen zu haben, da sie viel kleiner sind und daher viel kleinere Anströmflächen und Taumel-Bewegungen aufweisen. Konfettipartikel sind auch kleiner und haben eine kürzere Brenndauer nach der Zündung, was die Detektion anderer Konfettipartikel nicht so stark beeinträchtigt. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf Partikel Tracking-by-detecton sind daher wesentlich geringer. Aufgrund ihrer geringen Größen kommt es jedoch zu größeren Schwankungen bei den von der Kamera erfassten und aufgezeichneten 3D-Koordinaten, wie die Fluktuationen der 3D-Trajektorien in Abbildung 83 oben rechts aufzeigt. Anhand der Grauwert-Flugbahn in Abbildung 83 unten rechts und des optischen Ground Truths ist zu erkennen, dass Konfetti auch im Flug zündet. Das analysierte Abbrandverhalten wird in Arbeitspaket 11 dargestellt.

Abbildung 84 stellt die Tracking- und Regressionsergebnisse von PE-Granulat über 3029 Frames dar. Wie bereits erwähnt, benötigen die PE-Granulate aufgrund ihrer Durchsichtigkeit und kleineren Größen eine längere Belichtungszeit, was auch zu einer Halbierung der Framerate führt. Bei der gleichen Sequenzlänge von 3000 Frames ist die absolute Dauer der Sequenz etwa doppelt so lang wie die der anderen Komponenten, was deutlich mehr Spuren führt. Dies ist vorteilhaft für die anschließende statistische Analyse des Verhaltens. Im Vergleich zu Papier hat PE-Granulat eine höhere Masse und einen geringeren Strömungswiderstand, so dass seine Fluggeschwindigkeit hauptsächlich von der Anfangsgeschwindigkeit und der Schwerkraft beeinflusst wird, wodurch seine Flugbahnen regelmäßiger und damit leichter zu verfolgen sind. Aufgrund ihrer geringen Größe schwanken die durch die Kamera gelieferten 3D-Koordinaten der Partikel, wie die von Konfetti, erheblich. Wie aus den dreidimensionalen Flugbahnen in Graustufen (Abbildung 84 rechts unten) ersichtlich ist, ist es sehr unwahrscheinlich, dass PE-Granulat im Flug zündet. Einige PE-Granulat Partikel zünden beim Auftreffen auf der Drehrohrinnenwand.

Die Ergebnisse des Trackings und der 3D-Regression der Holzhackschnitzel sind in Abbildung 85 dargestellt. Auch die Flugbahnen der Holzschnitzel sind aufgrund ihrer relativ konzentrierten Massen und Größen ähnlich wie bei PE-Granulat gleichmäßiger als die von Papierschnipseln. Jedoch sind die Holzhackschnitzel nicht so transparent wie die PE-Granulate, so dass ihre Sichtbarkeit ebenfalls besser ist, was die Partikeldetektion genauer macht und das darauf aufbauende Tracking erleichtert. Auch die Bewegungen der Holzhackschnitzel werden im Wesentlichen nur von der Anfangsgeschwindigkeit und der Schwerkraft beeinflusst, so dass ihre Flugbahnen eher Parabeln entsprechen. Die Holzhackschnitzel bewegen sich schnell und zünden nicht im Flug. Da ein Teil der Holzhackschnitzel die Wand erst berührt, nachdem sie den Sichtbereich der Kamera verlassen haben, wird deren tatsächliche Flugzeit länger sein als berechnet.



Trajektorien von Papierschnipsel
 Framelänge: 1-500
 Zeitlänge: 1.5s

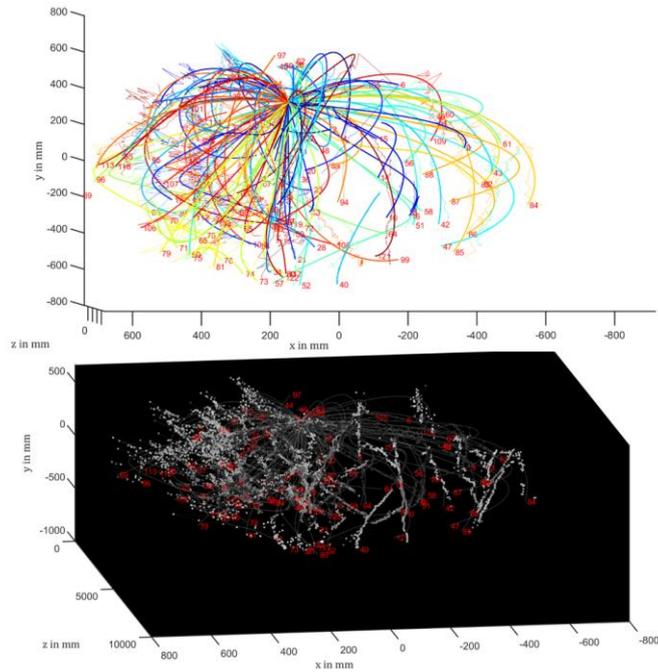
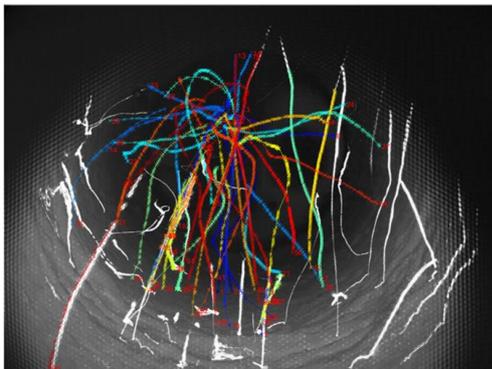


Abbildung 82. Tracking- und Regressionsergebnis von Papierschnipsel über 500 Frames.



Trajektorien von Konfetti
 Framelänge: 1-3126
 Zeitlänge: 9.47s

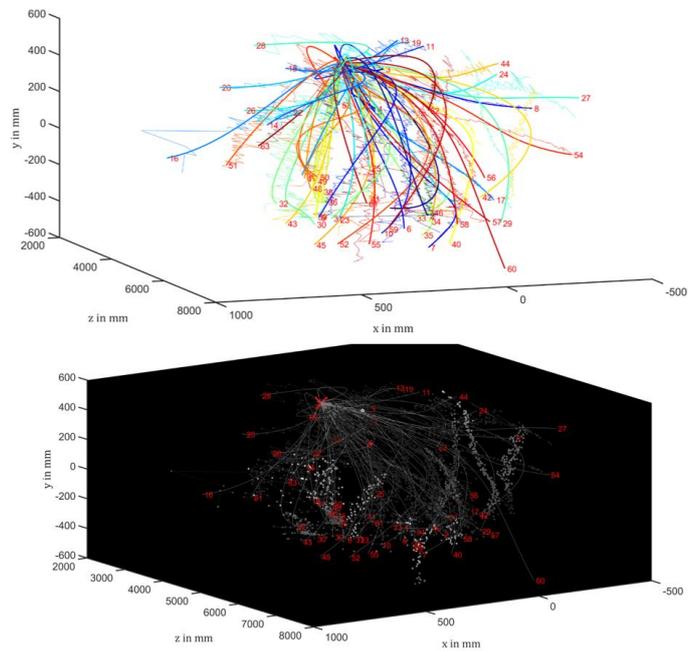
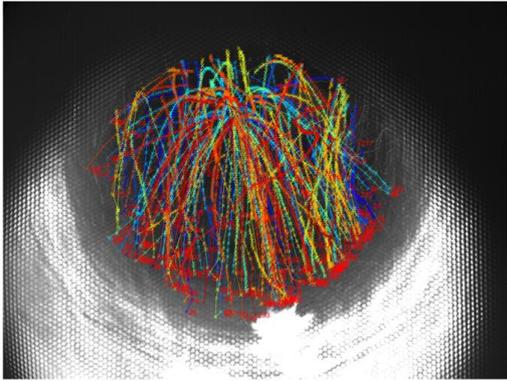


Abbildung 83. Tracking- und Regressionsergebnis von Konfetti über 3126 Frames.



Trajektorien von PE-Granulat
 Framelänge: 1-3029
 Zeitlänge: 19.69s

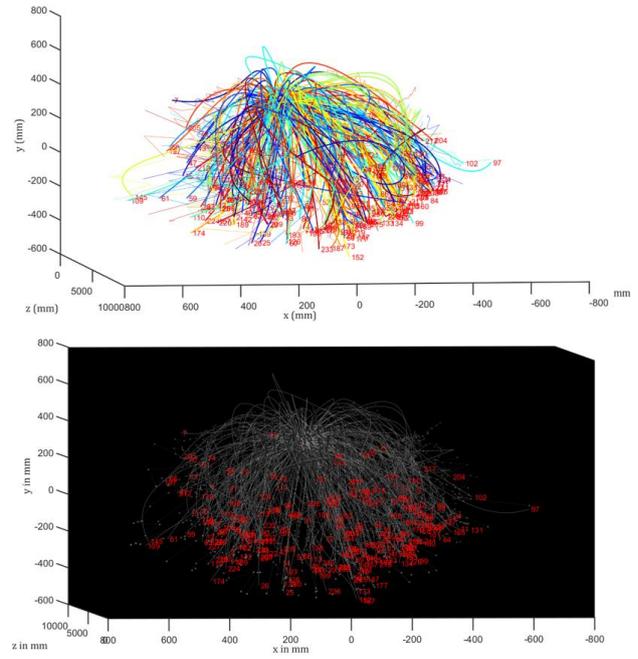
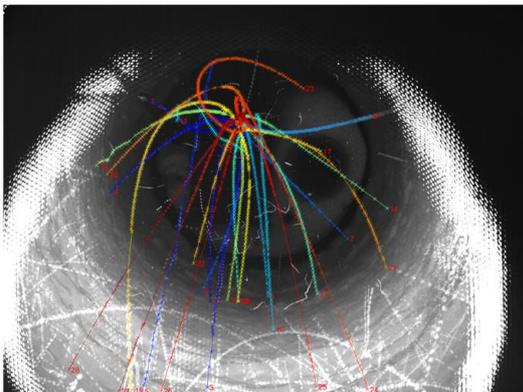


Abbildung 84. Tracking- und Regressionsergebnis von PE-Granulat über 3029 Frames.



Trajektorien von Holzhackschnitzel
 Framelänge: 1-3102
 Zeitlänge: 9.4s

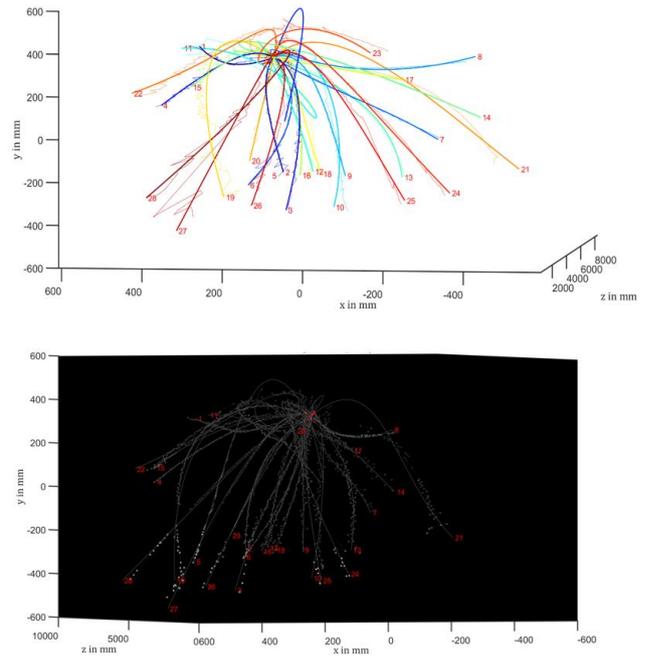


Abbildung 85. Tracking- und Regressionsergebnis von Holzhackschnitzel über 3102 Frames.

Ergebnisse bei Förderdruck 5 bar

Für die Experimente mit 5 bar Förderdruck wird ebenfalls zunächst die optische Ground Truth für jede Fraktion über jede ganze Sequenz in Abbildung 86 dargestellt. Generell scheinen sich die Flugbahnen der Fraktionen bei 5 bar nur leicht von denen bei 4,5 bar zu unterscheiden.

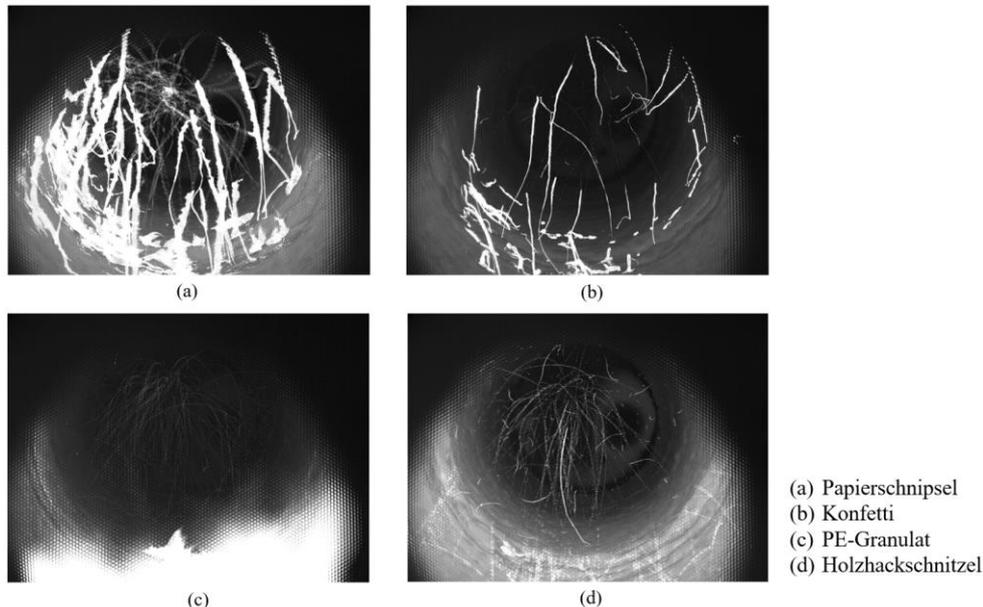


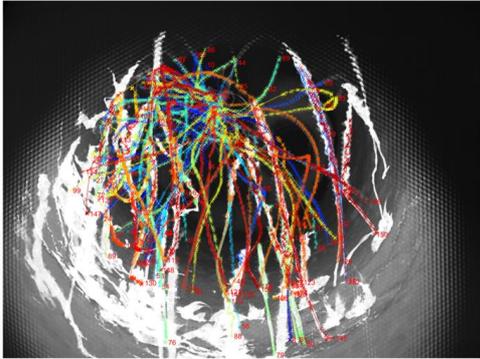
Abbildung 86. Optische Ground Truth von verschiedenen Fraktionen der Ersatzbrennstoffe im Drehrohr bei 5 bar Förderdruck. (a) Papierschnipsel. (b) Konfetti. (c) PE-Granulat. (d) Holzackschnitzel.

Die nicht gezündeten Partikel können – aufgrund der relativ hohen Innenwandtemperatur bei den Experimenten mit 5 bar Förderdruck - ebenfalls von der Kamera erfasst werden, was das vollständige Partikel-Tracking ermöglicht. Die Abstände zwischen zwei hellen Holzackschnitzeln sind auch hier deutlich größer als für die anderen drei Fraktionen. Während Papierschnipsel und Konfetti im Flug zünden, landen - unter der Versuchsbedingung - PE-Granulat und Holzackschnitzel ungezündet an der Drehrohrinnenwand.

Die Ergebnisse der verschiedenen Fraktionen werden nachfolgend wieder getrennt dargestellt, inklusive der 2D-Spuren, der konvertierten und annähernden 3D-Spuren und der entsprechenden 3D-Grauwert-Spuren, wie für die Experimente bei 4,5 bar Förderdruck. Abbildung 87 - Abbildung 90 stellen die erhaltenen Trajektorien der jeweiligen Fraktion dar. Wegen der manuellen und damit teilweise zufälligen Dosierung wurden bei den Experimenten mit Papierschnipseln nicht übermäßig viele Partikel ins Drehrohr eingebracht, weswegen hier die optische Ground Truth über die ganze Sequenz dargestellt wird.

Abbildung 87 zeigt das Tracking und Regressionsergebnis für Papierschnipsel über 3002 Frames. Ähnlich wie beim 4,5 bar-Ergebnis sind die Flugbahnen der Papierschnipsel aufgrund des Windwiderstands und der Trudel-Bewegung unregelmäßiger. Im oberen Teil des Ground Truth ist zu sehen, dass sich ein Teil der Papierschnipsel erst nach oben bewegt, die ROI verlässt und dann erst zündet. Die vollständigen Flugbahnen dieser Partikel sind daher schwer zu ermitteln, da die Lichtfeldkamera nur unzureichende 3D-Informationen über die Partikel

außerhalb der ROI liefern kann. Dies beeinträchtigt die Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens von Papierschnipseln.



Trajektorien von Papierschnipsel
Framelänge: 1-3002
Zeitlänge: 9.10s

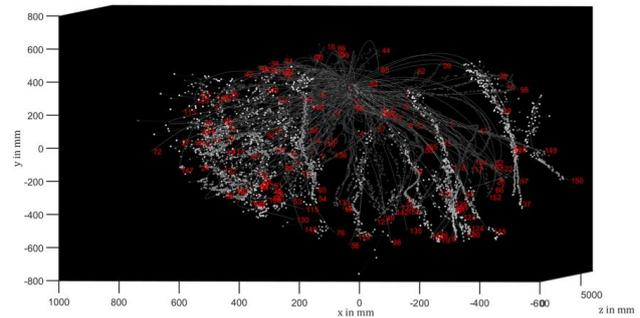
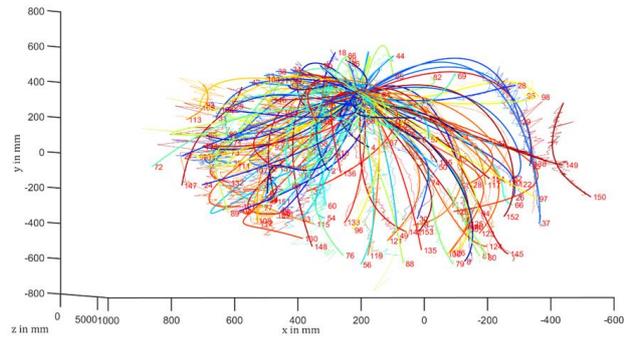
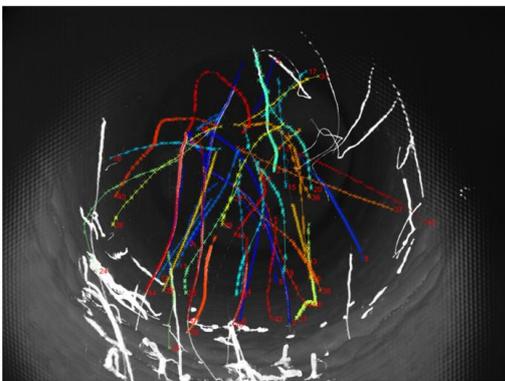


Abbildung 87. Tracking- und Regressionsergebnis von Papierschnipsel über 3002 Frames.



Trajektorien von Konfetti
Framelänge: 1-3286
Zeitlänge: 9.94s

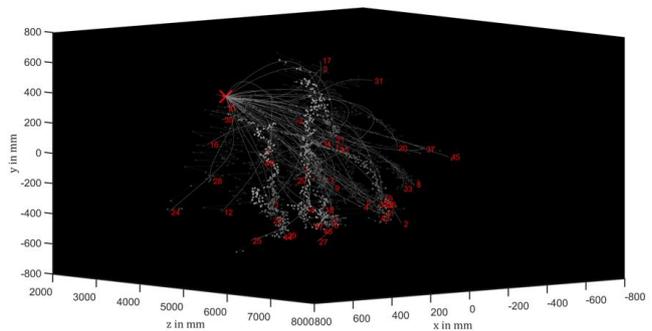
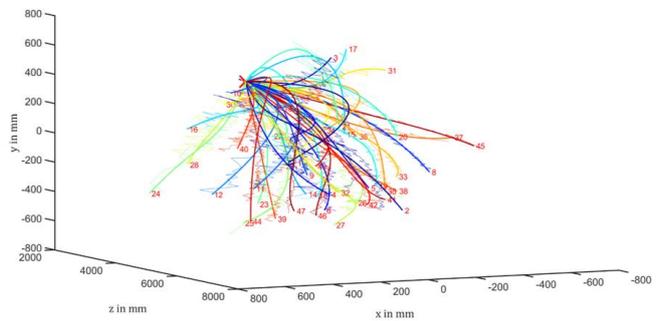


Abbildung 88. Tracking- und Regressionsergebnis von Konfetti über 3286 Frames.

Abbildung 88 zeigt die Tracking- und Regressionsergebnisse von Konfetti über 3286 Frames. Ähnlich wie beim 4,5 bar-Versuch zünden die Konfetti im Flug, und ihre Geschwindigkeiten nehmen während des Abbrands zu. Außerdem ist die durchschnittliche Brenndauer kürzer als bei den Papierschnipseln. Auch hier sind die Schwankungen in den dreidimensionalen Flugbahnen, die im 5 bar-Experiment ermittelt wurden, aufgrund der geringen Größe des Konfettis noch größer. Obwohl ungezündete Partikel visuell nur schwach wahrnehmbar sind, können sie mit den vorgeschlagenen Detektionsverfahren identifiziert werden.

Abbildung 89 zeigt die Tracking- und Regressionsergebnisse des PE-Granulats. Durch die Erhöhung des Förderdrucks können sich die Austrittsgeschwindigkeiten einiger Partikel ändern, aber die Bewegung der Partikel wird nach wie vor hauptsächlich von der Schwerkraft dominiert, so dass ihre Flugbahnen im Vergleich zu den Partikeln aus Papier regelmäßig bleiben. Zudem ändert sich das Abbrandverhalten von PE-Granulat durch den gesteigerten Förderdruck im Vergleich zu 4,5 bar nicht wesentlich. Die meisten PE-Granulat-Partikel zünden nicht im Flug.

Abbildung 90 stellt die Trajektorien von Holzhackschnitzeln dar. Ähnlich wie bei den PE-Granulat-Ergebnissen wird das Flug- und Abbrandverhalten der Holzhackschnitzel durch den erhöhten Förderdruck nicht wesentlich beeinflusst. Im Vergleich zu den anderen Fraktionen bleiben die Holzhackschnitzel schneller und zünden nicht im Flug, zumindest unter den gegebenen Versuchsbedingungen.

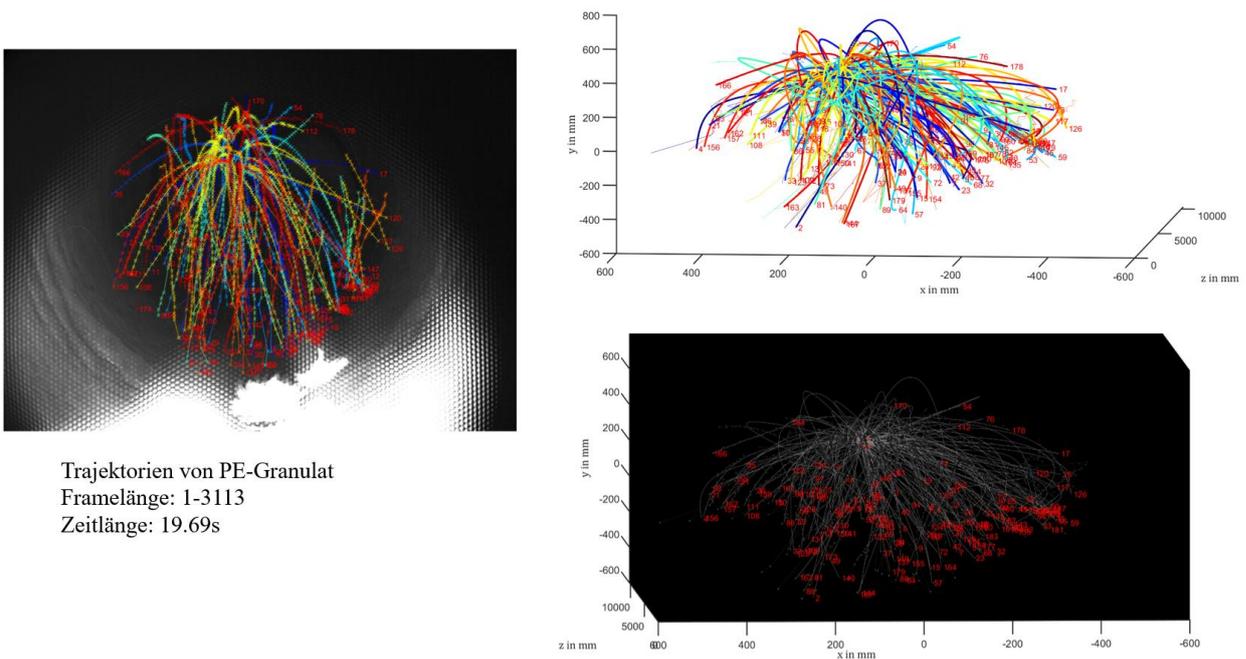
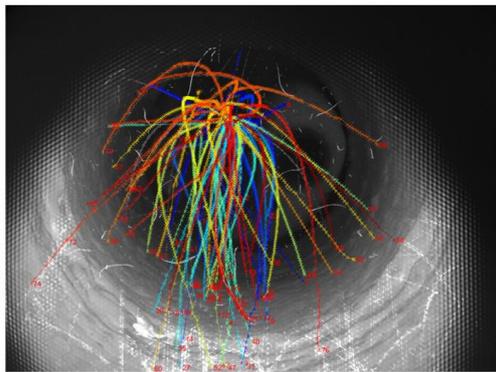


Abbildung 89. Tracking- und Regressionsergebnis von PE-Granulat über 3113 Frames.



Trajektorien von Holzhackschnitzel
Framelänge: 1-3234
Zeitlänge: 9.8s

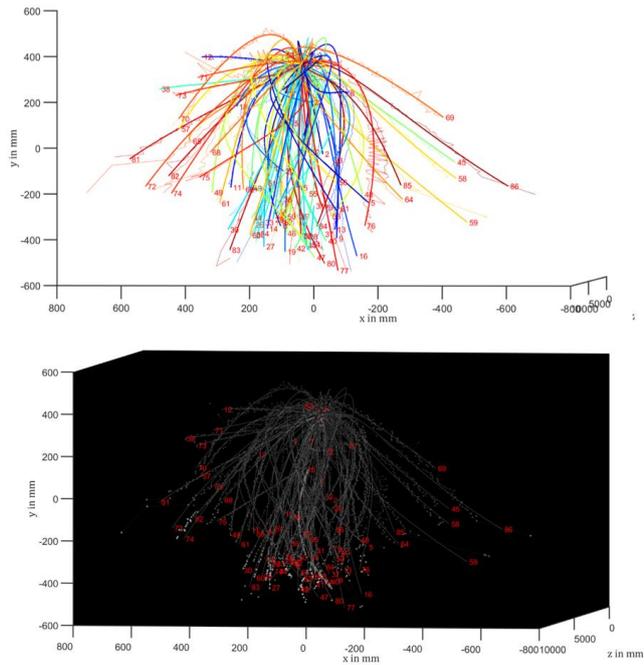


Abbildung 90. Tracking- und Regressionsergebnis von Holzhackschnitzel über 3234 Frames.

2.11 AP10: Simulation der Drehrohrversuche und Modellabgleich, Anwendung auf ein industrielles Zementdrehrohr (FS1, 7 MM)

Die Drehrohrversuche werden in diesem Arbeitspaket nachsimuliert und es wird geprüft, inwiefern sich die Simulationsmodelle auf ein halbtechnisches System übertragen lassen. Ebenso werden Parameterstudien anhand eines generischen Drehrohrofens durchgeführt.

Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurden die Drehrohrversuche mit Modellbrennstoffen aus Kapitel 2.10 simuliert. Es wurden die gleichen Randbedingungen wie bei der Versuchsdurchführung eingestellt und die in Kapitel 2.3 bestimmten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte sowie die in Kapitel 2.4 ermittelten Schmelztemperaturen ins Simulationsmodell integriert. Mit den angepassten sowie den ursprünglichen Simulationsmodellen wurde anschließend anhand eines generischen Drehrohrofens eine Parameterstudie durchgeführt, um die Unterschiede in den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Es wurde die Brennstoffzusammensetzung variiert und mögliche Einflüsse auf das System zu untersuchen.

Erzielte Ergebnisse der BRENDA Simulationen

Abbildung 91 zeigt die Simulationsdomäne des BRENDA-Drehrohrofens. Zu sehen sind die eingebrachte Lanze (links in blau) sowie die Trajektorien ausgewählter Modellbrennstoffpartikel. Die eingezeichneten Abstandsringe besitzen einen Abstand von einem Meter zueinander. Das in den Versuchen beobachtete Flugverhalten stimmt mit dem simulierten überein.

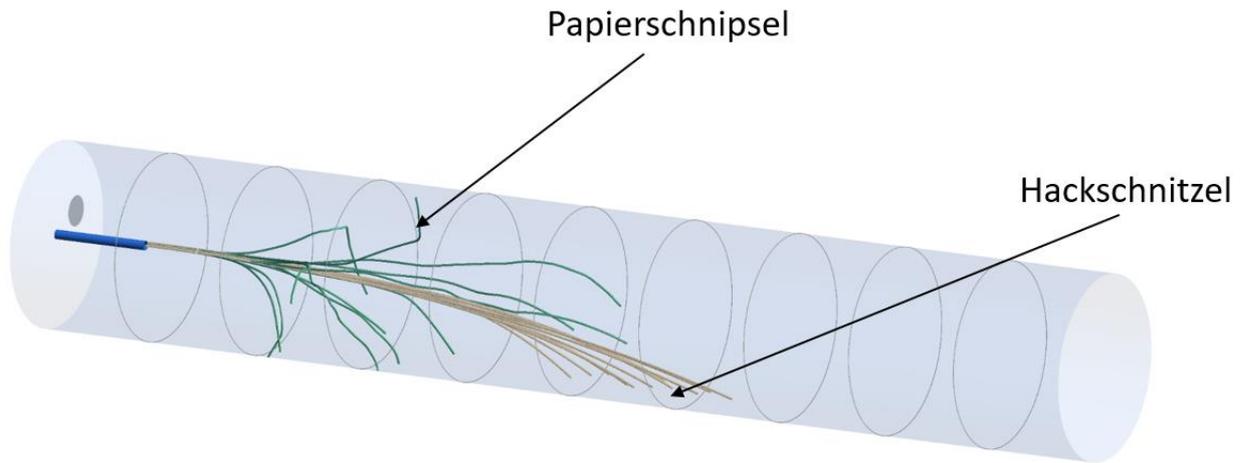


Abbildung 91. Simulationsdomäne der BRENDA-Versuchsanlage.

Die Holzplättchen weisen im Vergleich zu den Papierschnipseln ein deutlich homogeneres Flugverhalten auf. Diese landen größtenteils 5 m bis 6 m von der Stirnseite des Ofens entfernt. Dies stimmt ebenso mit den Beobachtungen durch die Lichtfeldkamera überein. Ebenso stimmen die experimentell ermittelten Flugzeiten (siehe Kapitel 2.11) mit den simulierten überein (siehe Auftreffpunkt in Abbildung 92 und Abbildung 93). Der obere bzw. untere Rand des Kastens entspricht dem 75 % bzw. 25 % Perzentil. Die Linie und der Zahlenwert innerhalb des Kastens repräsentieren den Median.

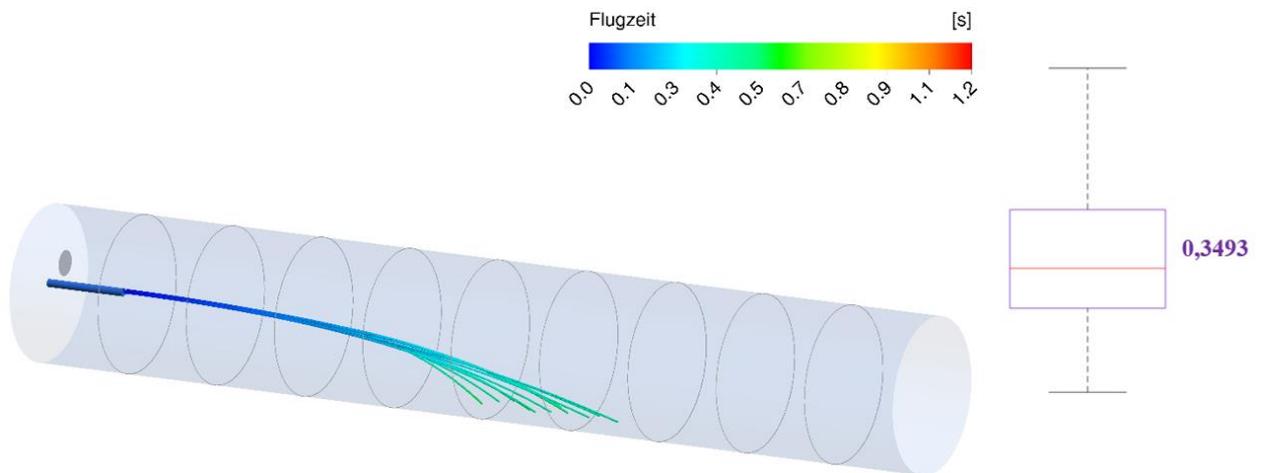


Abbildung 92. Vergleich der simulierten Flugzeiten (Holzplättchen) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft.

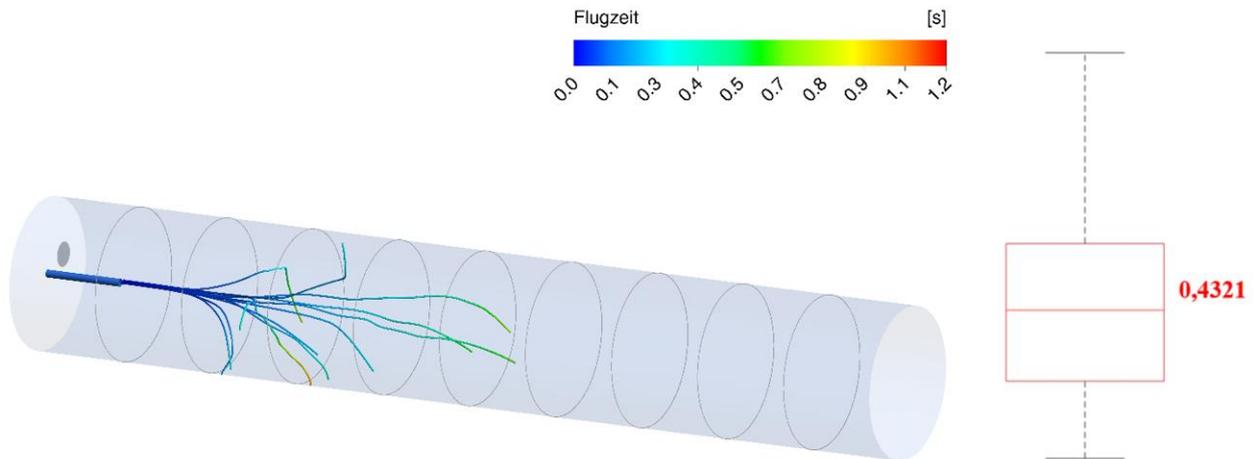


Abbildung 93. Vergleich der simulierten Flugzeiten (Papierschnipsel) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft.

Ebenso stimmen die in Längsachsenrichtung simulierten Geschwindigkeiten mit den experimentell ermittelten überein (siehe Abbildung 94 + Abbildung 95). Beim Auftreffen liegt die Geschwindigkeit zwischen 9 und 11 m/s (siehe Farbskala in Abbildung 94), was gut mit dem experimentell bestimmten Median für Papierschnipsel im Auftreffbereich von 10.9087 m/s übereinstimmt. Dieser Zusammenhang ist ebenso in Abbildung 95 ersichtlich.

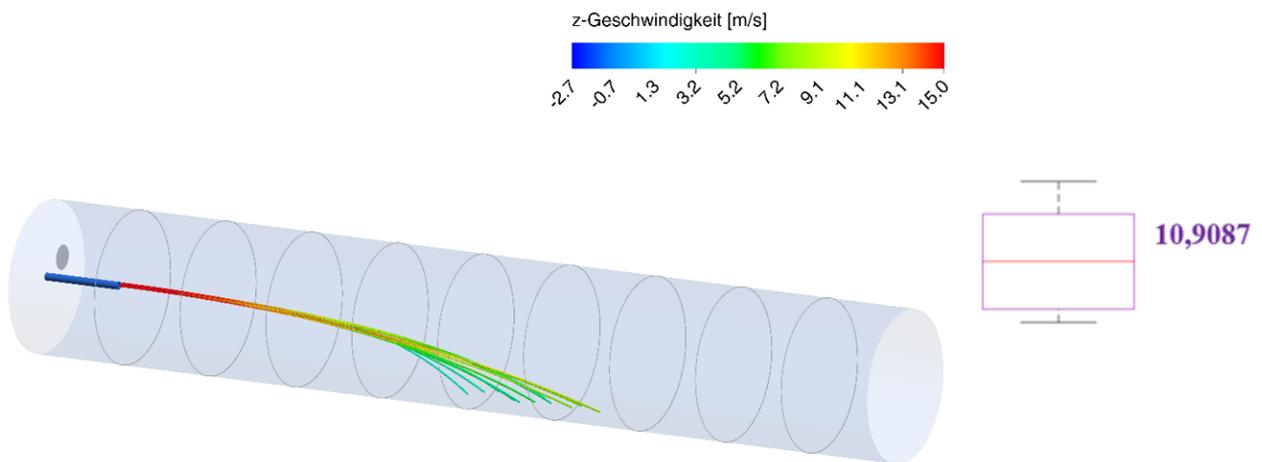


Abbildung 94. Vergleich der simulierten Geschwindigkeiten in Längsachsenrichtung (Hackschnitzel) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft im Auftreffbereich.

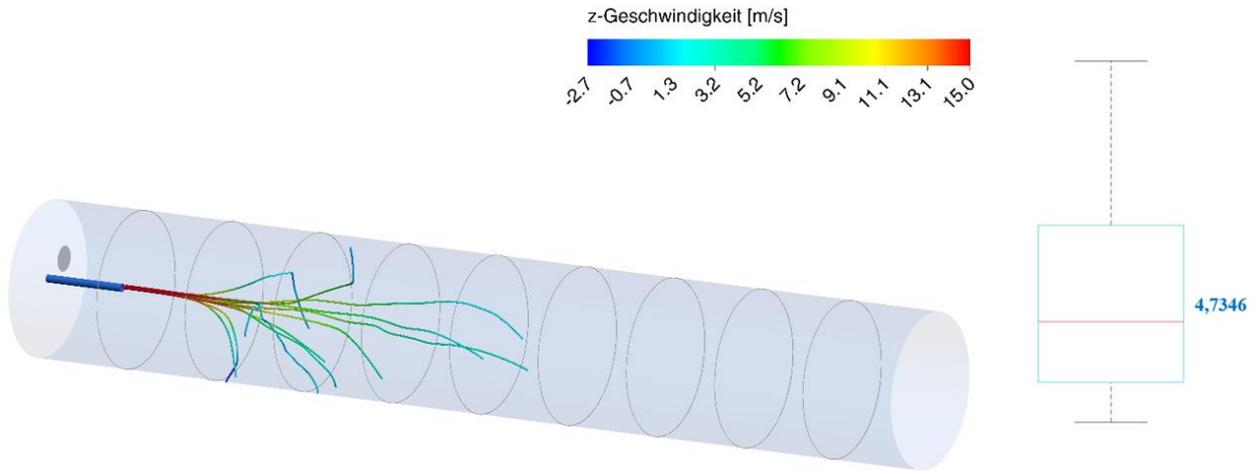


Abbildung 95. Vergleich der simulierten Geschwindigkeiten in Längsachsenrichtung (Papierschnipsel) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft im Auftreffbereich.

Auch für das PE-Granulat (Hostalen) und Konfetti stimmen die Flugzeiten (siehe Abbildung 96 und Abbildung 97) und Geschwindigkeiten in Längsachsenrichtung (siehe Abbildung 98 und Abbildung 99) ebenso gut mit den experimentell ermittelten Daten überein. Konfetti verhält sich dabei ähnlich zu den Papierschnipseln, die im Vergleich zu den Hackschnitzeln und Hostalen stärker dispergierende Trajektorien aufweisen.

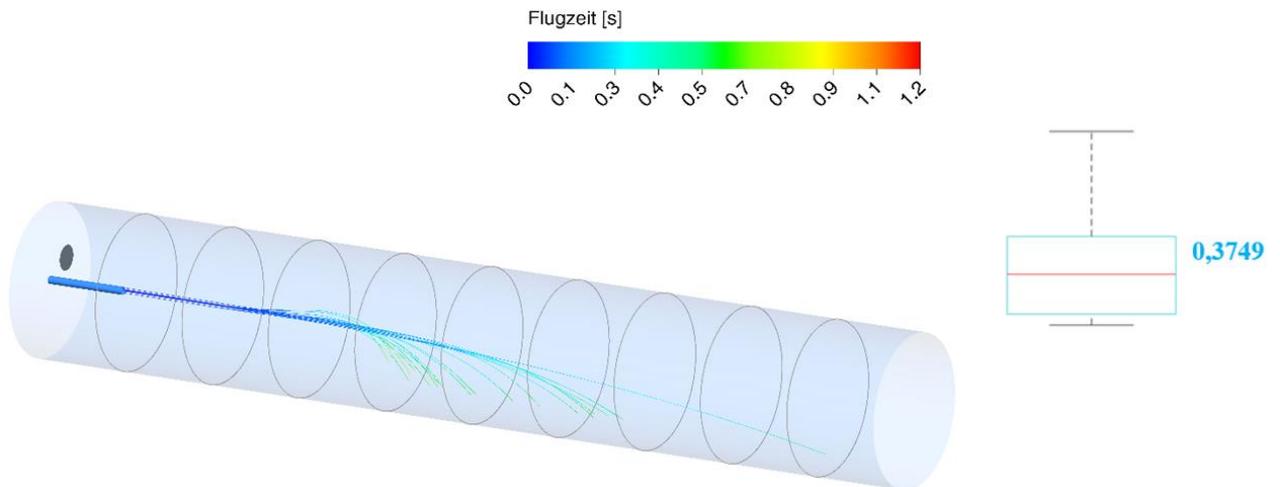


Abbildung 96. Vergleich der simulierten Flugzeiten (Hostalen) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft.

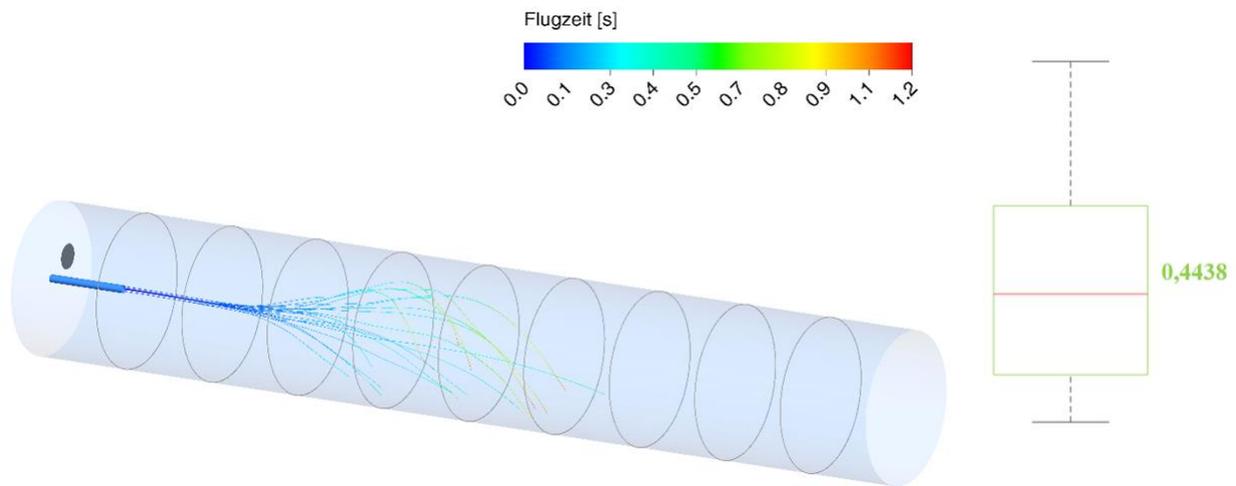


Abbildung 97. Vergleich der simulierten Flugzeiten (Konfetti) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft.

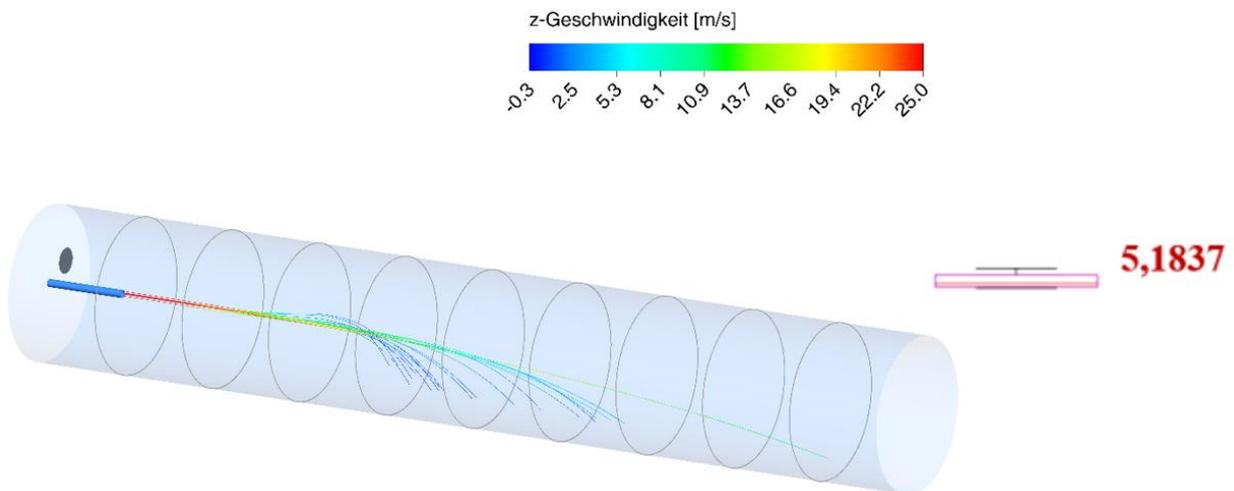


Abbildung 98. Vergleich der simulierten Geschwindigkeiten in Längsachsenrichtung (Hostalen) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft im Auftreffbereich.

Innerhalb der Simulationen wurden die Zündzeitpunkte durch den Beginn der Pyrolyse des Partikels bestimmt. Sobald ein signifikanter Anstieg der Pyrolyserate vorliegt, wird davon ausgegangen, dass das Partikel mit der Verbrennung beginnt. Die durch die Simulationen ermittelten Zündzeitpunkte decken sich ebenfalls mit den durch die Experimente bestimmten Zeiten. Dabei wurden die Zündzeitpunkte randomisierter Partikel exemplarisch in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt.

Insgesamt wurde die Tauglichkeit der Flug- und Abbrandmodelle durch den angestellten Vergleich zwischen Simulationen und Experimenten bewiesen.

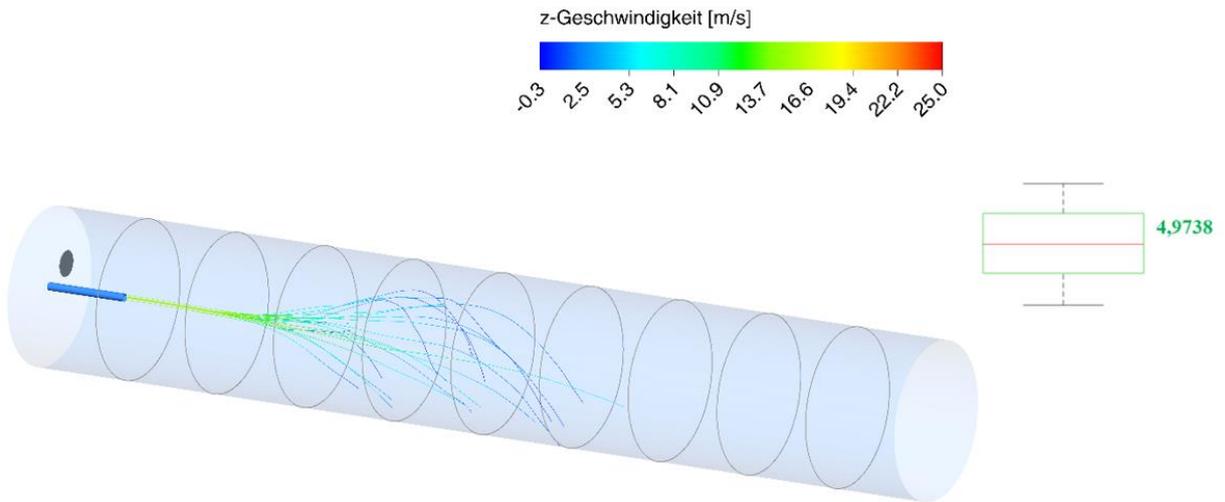


Abbildung 99. Vergleich der simulierten Geschwindigkeiten in Längsachsenrichtung (Konfetti) mit den experimentell ermittelten bei 5 bar Förderluft im Auftreffbereich.

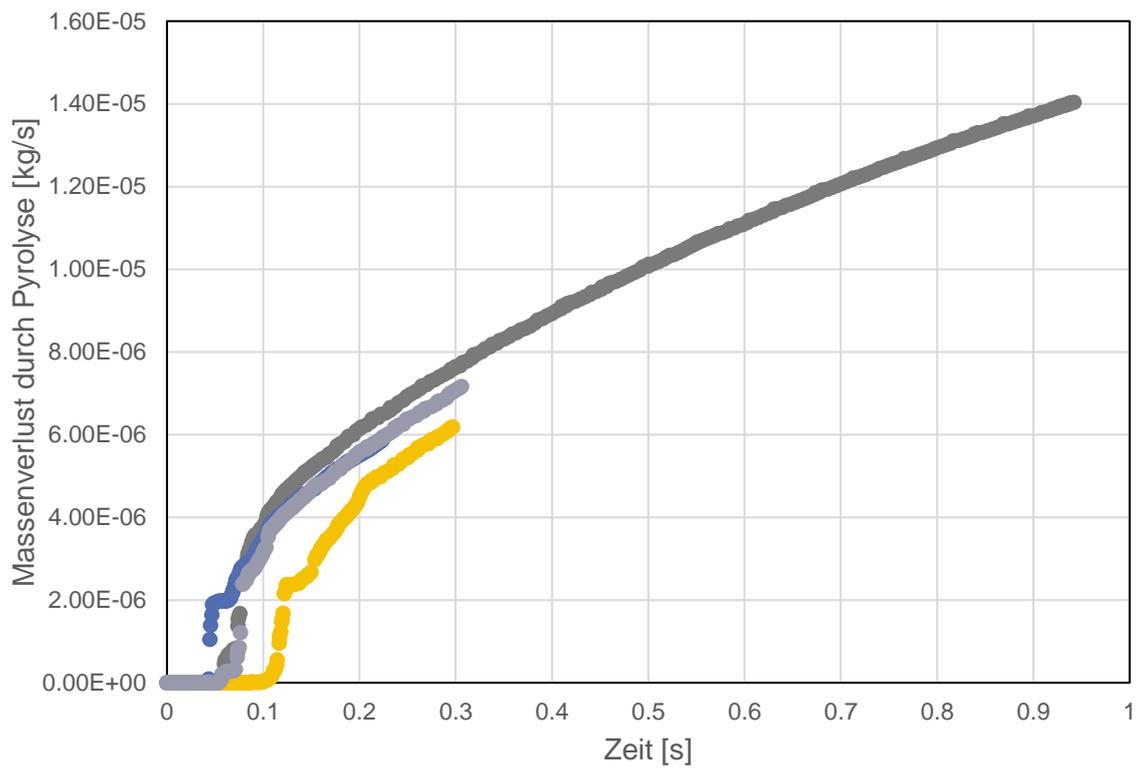


Abbildung 100. Zündzeitpunkte (Konfetti) repräsentiert durch die Pyrolyserate.

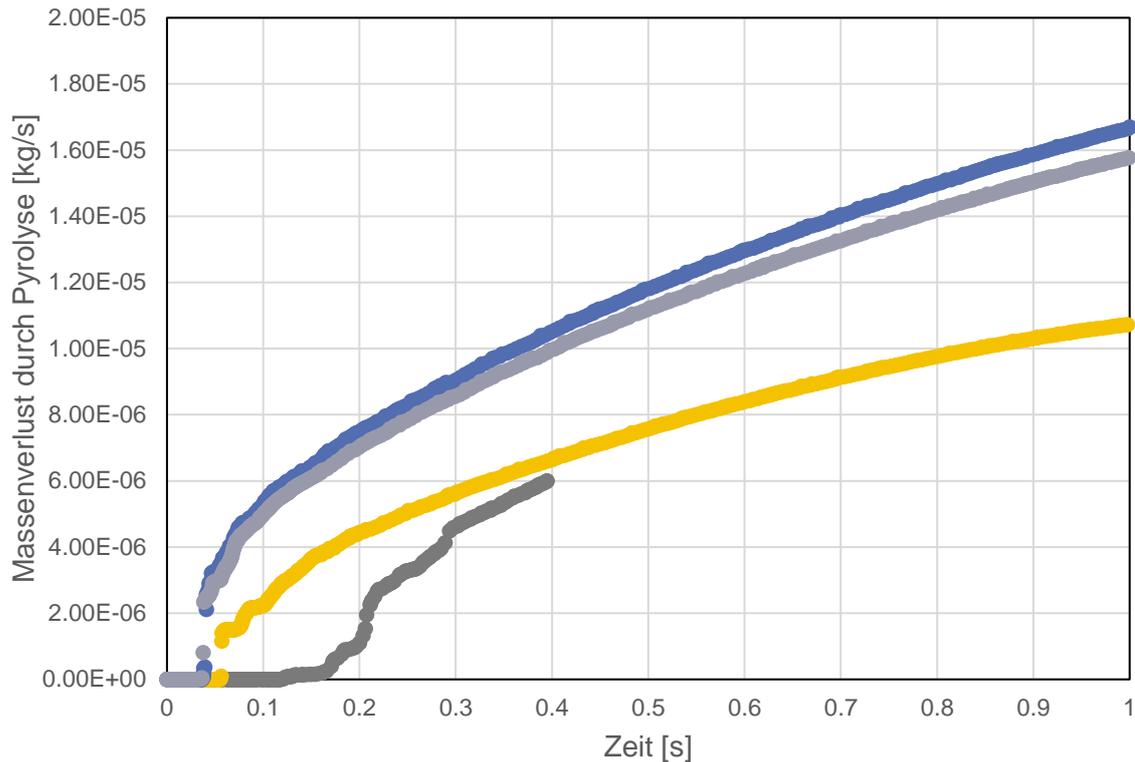


Abbildung 101. Zündzeitpunkte (Papierschnipsel) repräsentiert durch die Pyrolyserate.

Erzielte Ergebnisse der Parameterstudie

In dieser Parameterstudie wurde ein generischer, an reale Anlagen angelehnter Zementdrehrohrofen simuliert, bei dem das Rohmehl aufgrund der Vorcalciniierung im fast im entsäuerten Zustand eintritt. Eine schematische Skizze der Drehrohrofens und der Brennerkonfiguration ist in Abbildung 102 dargestellt.

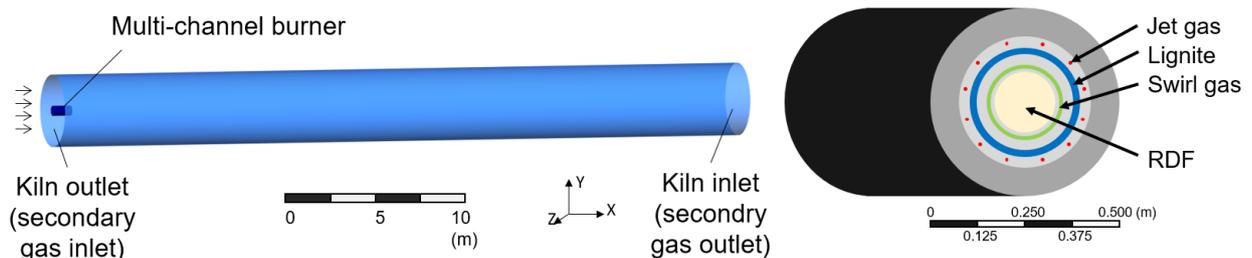


Abbildung 102. Generischer Drehrohrofen (links) und verwendeter Brenner (rechts) [34].

Die folgenden Spezifikationen des Drehrohrofens wurden bei den Simulationen verwendet:

- Länge: 40 m
- Durchmesser: 4 m
- Neigung: 2°
- Wärmeeintrag: 35 MW

Dabei wurden drei verschiedene Fälle untersucht. Fall V0 zeigt die Simulationsergebnisse mit den alten Simulationsmodellen, V1 wurde mit den angepassten Simulationsmodellen gerechnet.

In V3 wurde die Brennstoffzusammensetzung angepasst und 50 % mehr 3D-Kunststoffe und entsprechend weniger Folien verfeuert, der Wärmeeintrag wurde dabei konstant gehalten. Die Abbildung 103 und Abbildung 104 geben einen Überblick über die Flugweiten der Hauptfraktionen für die ursprünglichen Simulationsmodelle. 3D-Kunststoffe, als schwerste Fraktion, haben dabei die kürzeste Flugweite. Auch PPK-Partikel fallen aufgrund ihrer hohen Masse vermehrt frühzeitig nach unten. Am weitesten werden Folien und Textilien ausgebracht. Ein Vergleich der ursprünglichen Simulationsmodelle mit den angepassten findet nachfolgend statt.

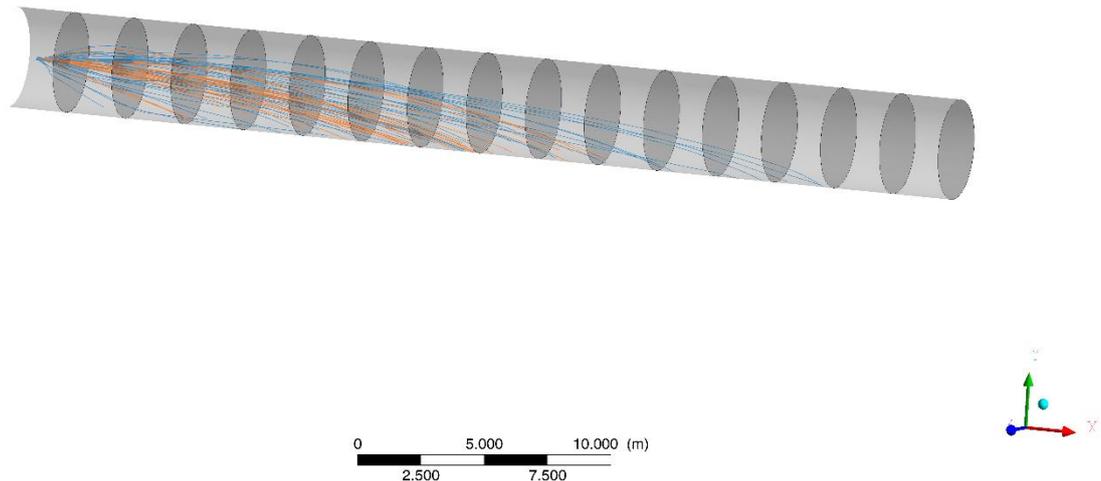


Abbildung 103. Vergleich der Partikeltrajektorien zwischen 3D-Kunststoffen (orange) und Folien (blau) anhand des ursprünglichen Simulationsmodells.

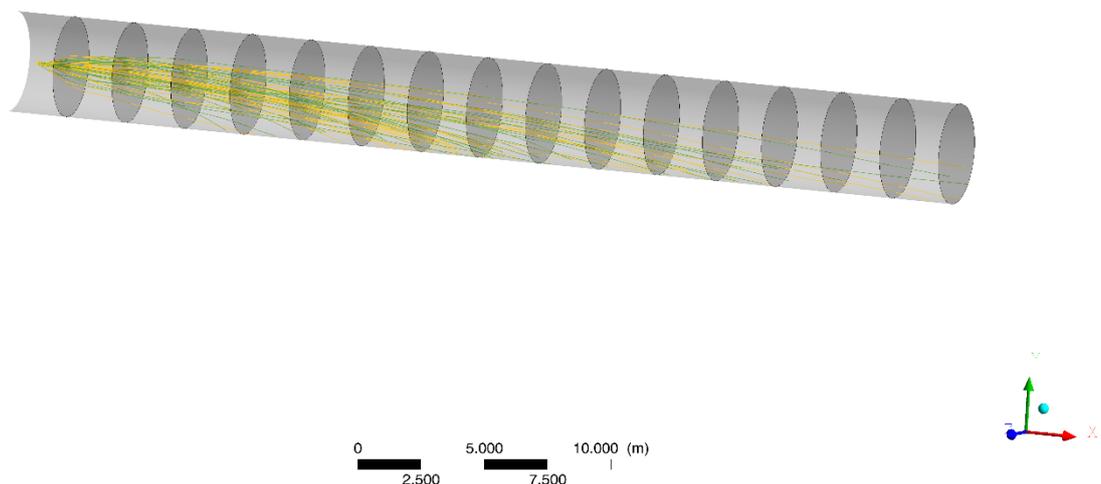


Abbildung 104. Vergleich der Partikeltrajektorien von PPK (gelb) und Textilien (grün) anhand des ursprünglichen Simulationsmodells.

Insbesondere, wenn Partikel noch nicht vollständig umgesetzt im Klinkerbett landen, kann dies die Qualität des Klinkers beeinflussen. Die Abbildung 105 zeigt die Umsetzungsgrade für die verschiedenen Fraktionen bevor diese ins Klinkerbett fallen im Vergleich zwischen den

ursprünglichen und angepassten Simulationsmodellen auf. Es ist ersichtlich dass die Umsetzungsrate (bevor Partikel im Klinkerbett landen) bei den angepassten Simulationsmodellen im Vergleich zu den ursprünglichen Modellen insgesamt höher ist. Dies ist zu einem durch die höher ausfallenden Widerstandsbeiwerte zu begründen. Zum anderen kommen bei den synthetischen Fraktionen die höheren Schmelztemperaturen (siehe Kapitel 2.4) zum Tragen, wodurch die Kunststoffe erst zu einem späteren Zeitpunkt in eine sphärische Form übergehen.

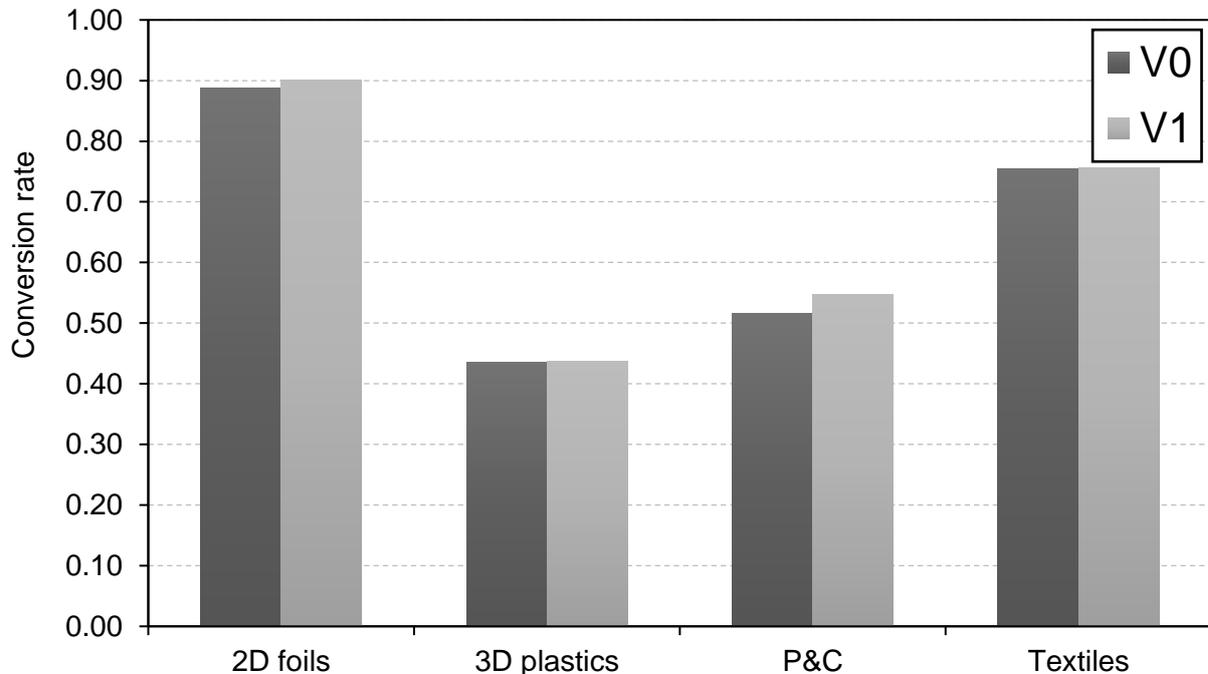


Abbildung 105. Umsetzungsgrade verschiedener FLUFF-Fraktionen.

Zudem ist erkennbar, dass 3D-Kunststoffe in beiden Fällen die Fraktion mit der geringsten Umsetzung darstellen. Aus diesem Grund wurde in V2 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, indem 50 % mehr 3D-Kunststoffe (bei insgesamt gleichem Wärmeeintrag) aufgegeben wurden. Nicht nur der Umwandlungsgrad, sondern auch der Auftreffpunkt ist von Interesse. Letzterer beeinflusst entscheidend das Temperaturprofil innerhalb des Drehrohrofens und hat damit maßgeblich Einfluss auf die ablaufenden mineralogischen Reaktionen im Klinkerbett. Aus diesem Grunde wurden in Abbildung 106 die Auftreffpunkte unverbrannter 3D-Kunststoffe von Fall V1 und V2 gegenübergestellt. Es fällt auf, dass die Auftreffpunkte ähnlich sind, in Fall V2 jedoch deutlich mehr 3D-Kunststoffe unverbrannt im Klinkerbett landen.

Die Parameterstudie zeigt, dass vor allem 3D-Kunststoffe aufgrund ihrer Neigung unverbrannt ins Klinkerbett zu fallen als kritisch zu bewerten sind.

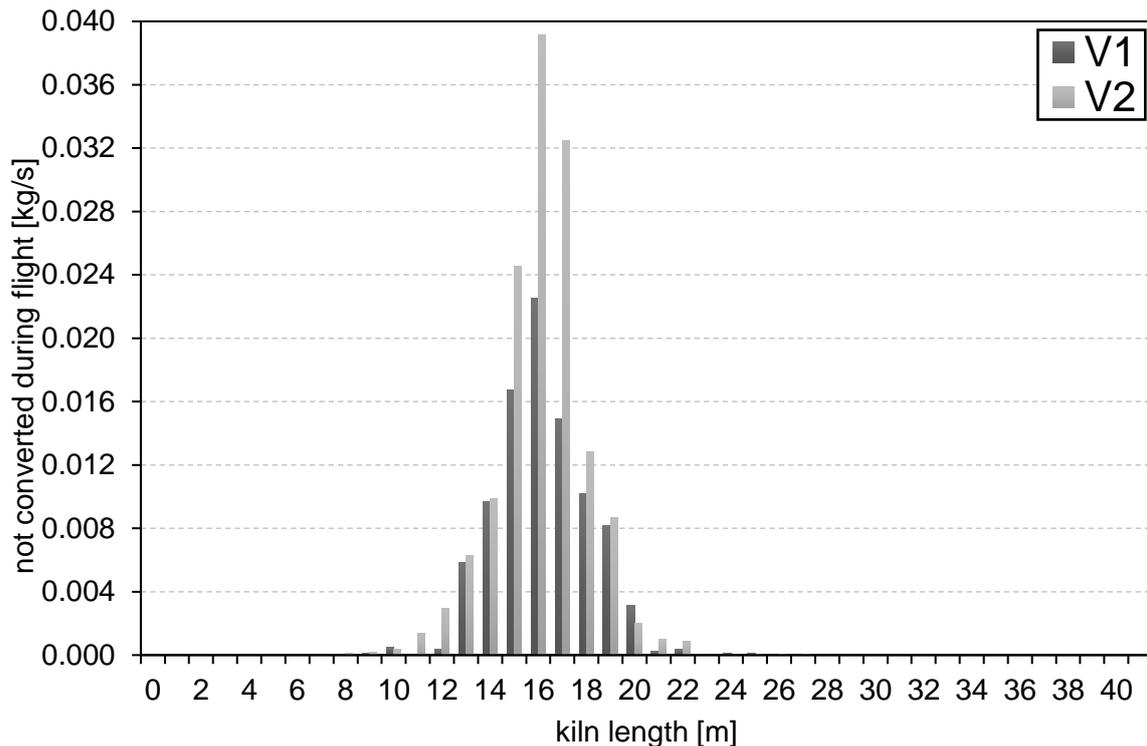


Abbildung 106. Vergleich der Auftreffpunkte zwischen Fall V1 und V2.

2.11 AP11: Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens, Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie der EBS-Datenbank (FS1, 3 PM, FS2, 2 PM, FS3, 3 PM)

Durchgeführte Arbeiten

Aufgrund der aus den obigen Arbeiten erhaltenen Partikeltrajektorien kann das Flug- und Abbrandverhalten der verschiedenen Fraktionen analysiert werden. Da im heißen Fallschacht nicht genügend vollständige Trajektorien gewonnen werden konnten, wird die Analyse auf die im Drehrohr gewonnenen Trajektorien fokussiert. Zunächst wird das Flugverhalten der verschiedenen Fraktionen hinsichtlich zweier Aspekte untersucht: der Flugdauer und der Fluggeschwindigkeit.

Wir definieren die Flugdauer als die Zeit zwischen dem Austritt des Partikels aus der Lanze und seinem ersten Wandkontakt. Wenn das Partikel in der Luft ausbrennt, ergibt sich die Flugdauer als die Zeit zwischen seinem Austritt und seinem Erlöschen. Wenn einige der Partikel an die Drehrohrinnenwand prallen oder und dort weiterbrennen, wird diese Weiterverbrennungszeit nicht als Flugdauer gezählt. Wie in Arbeitspaket 9 (siehe Kapitel 2.10) gezeigt, prallt ein Teil des Holzhackschnittzels zurück und bewegt sich nach dem Kontakt in der Luft weiter. Da solche Partikel nach dem Abprallen den Sichtbereich der Kamera verlassen und deswegen nicht verfolgt werden können, endet die Flugdauer nach dem ersten Aufprall. Aufgrund der zufälligen Bewegung der Papierpartikel in Querrichtung und die im Wesentlichen nur von der Anfangsgeschwindigkeit beeinflusste Quer-Geschwindigkeit von PE-Granulat-Partikeln und Holzhackschnittzeln, werden wir keine statistische Analyse der Geschwindigkeit in Querrichtung durchführen. Die vertikale Geschwindigkeit hingegen wird durch eine Mischung aus Schwerkraft

und Luftwiderstand beeinflusst und wird ebenfalls hier nicht gezeigt. Die Analyse der Geschwindigkeit in Tiefenrichtung stellt den Schwerpunkt der nachfolgend gezeigten Ergebnisse dar. Die Analyse der Tiefengeschwindigkeit wird space-sliced durchgeführt, d. h. die Lanze wird als Ursprung markiert und für jeden Meter wird ein Intervall festgelegt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit in jedem Ein-Meter-Intervall wird berechnet. Für den Vergleich des Abbrandverhaltens wird in diesem Projekt nur der Zündzeitpunkt der Partikel herangezogen.

Erzielte Ergebnisse

Zunächst wird das Flugverhalten von verschiedenen Ersatzbrennstoffen dargestellt, inklusive der Flugdauer und space-sliced Tiefengeschwindigkeiten. Danach werden die Zündzeitpunkte der einzelnen Fraktionen untersucht.

Flugverhalten verschiedener Ersatzbrennstoff-Fraktionen

(a) Flugdauer

4,5 bar

In Abbildung 107 und Abbildung 108 wird die Flugdauer der Partikelfraktionen durch Box-plots dargestellt. Die rote Linie innerhalb jeder Box steht für den Median der Flugdauer der entsprechenden Fraktion, und der untere bzw. obere Rand der Box zeigen das 25. bzw. 75. Perzentil an. Die Whisker reichen bis zu den Extremwerten, die nicht als Ausreißer betrachtet werden, während die Ausreißer mit dem Symbol "+" dargestellt sind. Die Flugdauer bei 4,5 bar Förderdruck ist in der Abbildung 107 dargestellt.

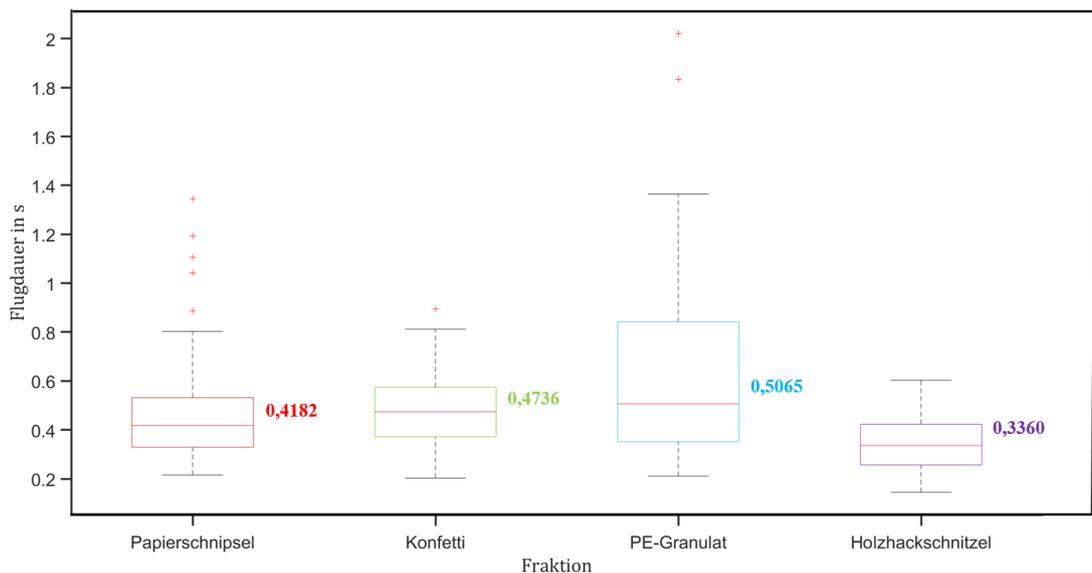


Abbildung 107. Flugdauer von verschiedenen Fraktionen bei 4,5 bar Förderdruck.

Wie aus dem Diagramm hervorgeht, liegt die mittlere Flugdauer für jede Fraktion etwa zwischen 0,3 s und 0,5 s. Von diesen hat PE-Granulat die längste und am ungleichmäßigste verteilte Flugdauer, während Holzhackschnittzel im Durchschnitt die kürzeste und konzentrierteste Verteilung aufweist. Die Flugdauer von Papierschnipseln und Konfetti sind in Bezug auf Median und Verteilung sehr ähnlich. Wie in der Abbildung 107 ebenfalls zu erkennen, gibt es einige Ausreißer mit einer Flugdauer von knapp 1 s, was auf bei einigen Partikeln gelegentlich auftretende komplexe Flugbahnen zurückzuführen ist.

5 bar

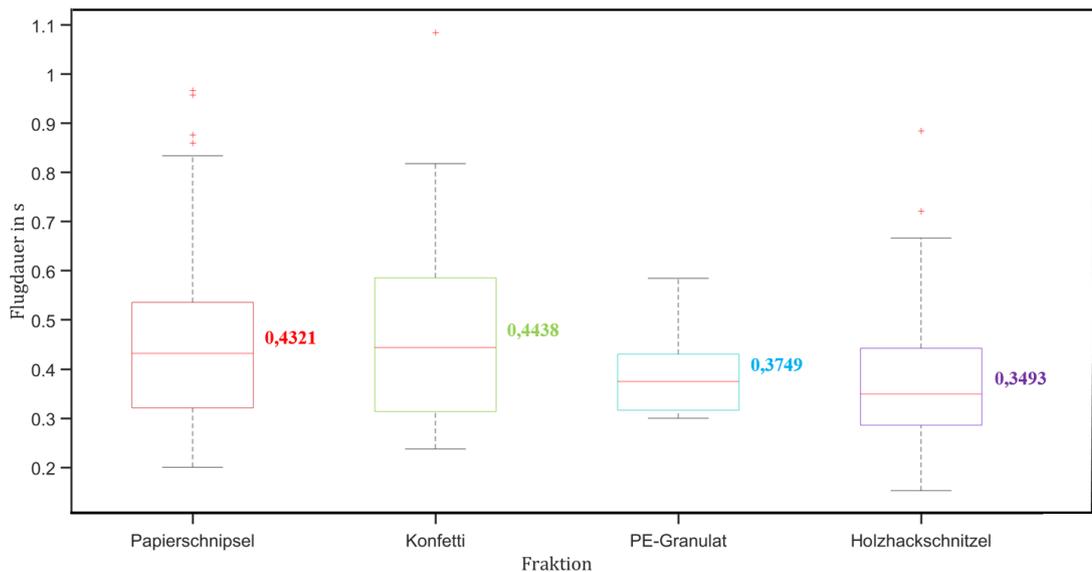


Abbildung 108. Flugdauer von verschiedenen Fraktionen bei 5 bar Förderdruck.

Abbildung 108 zeigt die Flugdauer mit verschiedenen Komponenten bei 5 bar Förderdruck. Insgesamt unterscheidet sich die Werte für die Flugdauer bei 5 bar Förderdruck nicht wesentlich von den bisherigen Werten bei 4,5 bar, außer dass die durchschnittliche Flugdauer bei PE-Granulat um 0,12 s kürzer ist. Generell liegt der Median der Flugdauer für alle Fraktionen zwischen 0,3 und 0,4 s. Von diesen hat Konfetti die längste Flugdauer, während Holzhacksnitzel aufgrund seiner schnelleren Bewegung die kürzeste Flugdauer hat. Die Flugdauer ist für Papierschnitzel aufgrund der unregelmäßigen Bewegung der Partikel sehr ungleichmäßig verteilt.

(b) Fluggeschwindigkeit

Papierschnipsel

Abbildung 109 zeigt die Space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Papierschnipsel mit 4,5 bar und 5 bar Förderdruck. Wie in der Abbildung 109(a) dargestellt weisen die Papierschnipsel keine höhere Tiefengeschwindigkeit und ebenso keine langen Tiefenbewegungen auf. Mit einem Abstand von 1 m zur Lanze beträgt die mediale Geschwindigkeit 5,1969 m/s und danach nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand ab. Die Anzahl der Partikel, die in einer Entfernung von 2-3 m von Lanze verbleiben, nimmt stark ab. In Entfernungen von mehr als 3 m wurden keine Partikel entdeckt. Das liegt daran, dass die Querbewegung der Papierschnipsel sehr schnell ist und viele der Papierschnipsel die Seitenwände berühren, bevor sie sich weit von der Lanze entfernen können. In Abbildung 109 gibt es einige Ausreißer mit negativen Durchschnittsgeschwindigkeiten, da sich ein Teil der Partikel während ihres Fluges aufgrund einer Rezirkulation zurück in Richtung Lanze bewegt. Wenn der Förderdruck auf 5 bar erhöht wird, steigt die Tiefengeschwindigkeit der Papierschnipsel innerhalb von 1 m deutlich auf etwa 7 m/s an. Es ist jedoch zu beachten, dass die Anfangsgeschwindigkeit weitgehend von der Geschwindigkeit der Förderung beeinflusst wird. Mit einem Abstand von 1-2 m zu der Lanze nimmt die Geschwindigkeit rasch auf etwa 4 m/s ab. Eine für die statistische Auswertung ausreichend Anzahl von Partikeln mit über 2 m Entfernung von der Lanze wurden nicht erkannt.

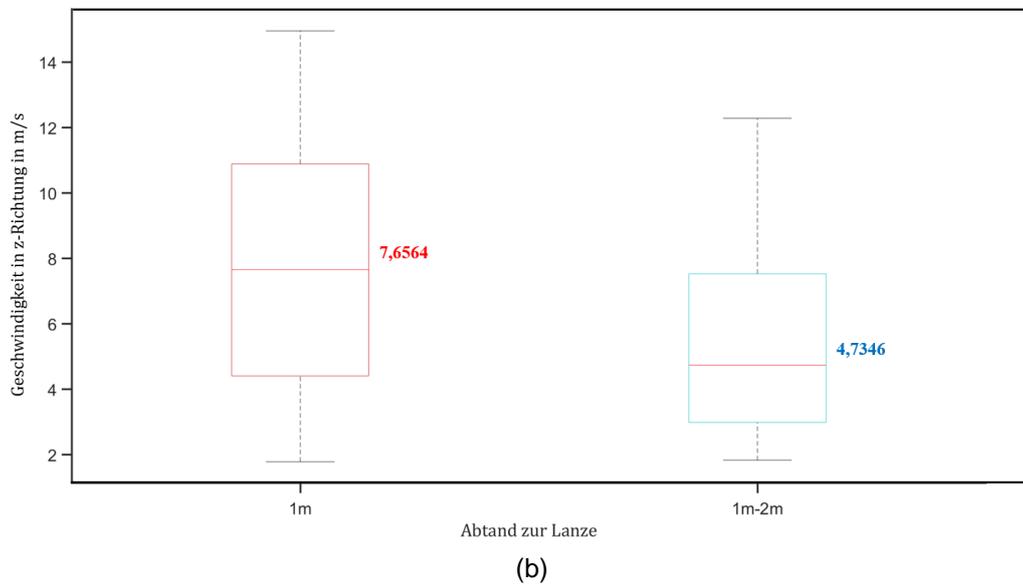
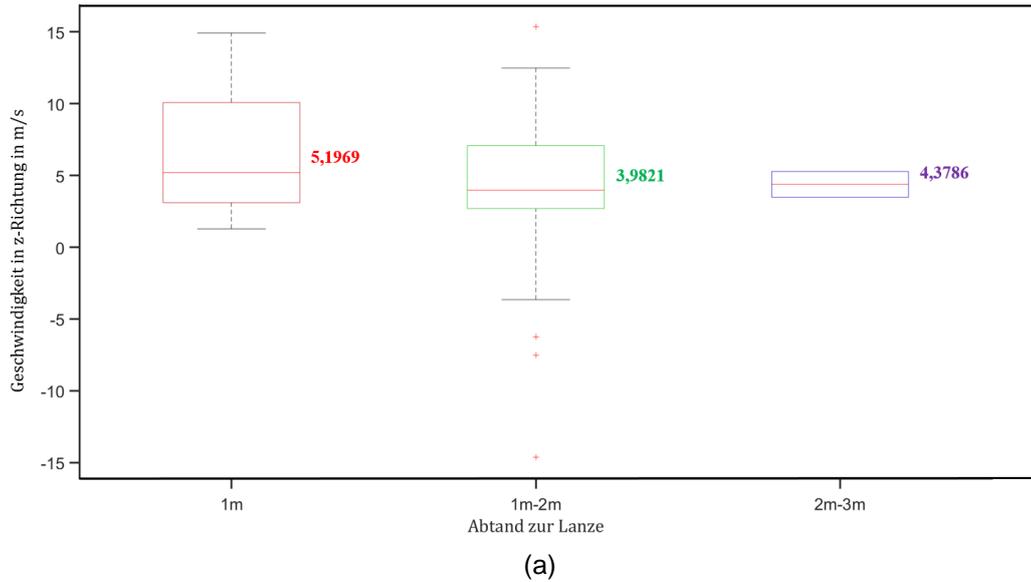


Abbildung 109. Space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Papierschnipseln bei 4,5 bar (oben) und 5 bar (unten) Förderdruck.

Die Tabelle 18 zeigt den Prozentsatz der in den einzelnen Entfernungen verbleibenden Papierschnipsel. Offenbar bewegt sich das Papierschnipsel nicht weit in der Tiefenrichtung. Etwa 60 % der Papierschnipsel erreichen eine Tiefenentfernung von 1 m bei 4,5 bar Förderdruck und 75 % der Papierschnipsel erreichen eine Entfernung von 1 m bei 5 bar erreichen. Bei beiden Förderdrücken erreichten weniger als 30% der Partikel eine Entfernung von 2 m zur Lanze.

Tabelle 18. Prozentualer Anteil der verbleibenden Papierschnipsel.

Abstand zur Lanze Förderdruck	1m	1m-2m	2m-3m	3m-4m	4m-5m	5m-6m
4,5bar	63,11%	29,13%	4,83%	0%	0%	0%
5bar	75,00%	22,58%	0%	0%	0%	0%

Konfetti

Abbildung 110 veranschaulicht die space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Konfetti bei 4,5 bar und 5 bar Förderdruck. Obwohl das Konfetti dasselbe Material wie Papierschnipsel hat, ist seine Tiefengeschwindigkeit etwas höher. Wie in der Abbildung 110(a) dargestellt, kann die Median-Geschwindigkeit innerhalb eines Abstandes von 2 m von der Lanze etwa 7,5 m/s erreichen. Im Vergleich zum Papierschnipsel können mehr Konfettipartikel auch Entfernungen von 2-3 m von Lanze erreichen. Durch das frühzeitige Abbrennen des Konfettis, dringen die Partikel nicht mehr weit in z-Richtung (Tiefe) vor. Daher sind kaum Konfetti-Partikel jenseits einer Entfernung von 3 m hinaus zu finden. Wenn der Förderdruck auf 5 bar erhöht wird, verringert sich die Geschwindigkeit von Konfetti erheblich. In einem Abstand von 1 m von der Lanze fällt die Geschwindigkeit auf etwa 5,5 m/s und dann weiter auf 5 m/s.

Die Tabelle 19 zeigt den Prozentsatz der in den einzelnen Entfernungen verbleibenden Konfetti. Das Konfetti bewegt sich ebenfalls nicht weit in der Tiefenrichtung. Allerdings erreichen mehr Konfetti eine Entfernung von 1 m zur Lanze als Papierschnipsel. Der Prozentsatz der Konfettipartikel, die eine Entfernung von 2 m erreichen können, ist wesentlich geringer.

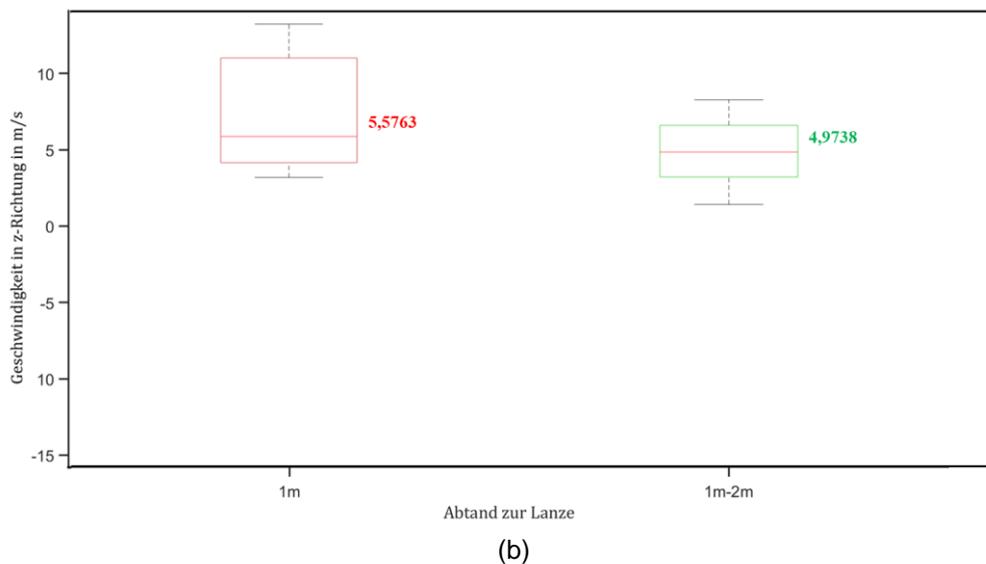
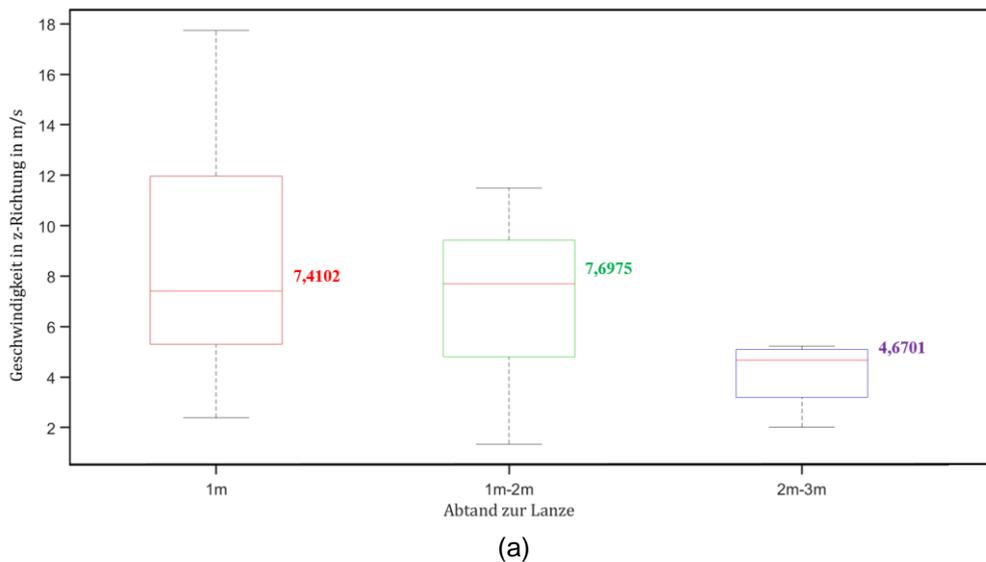


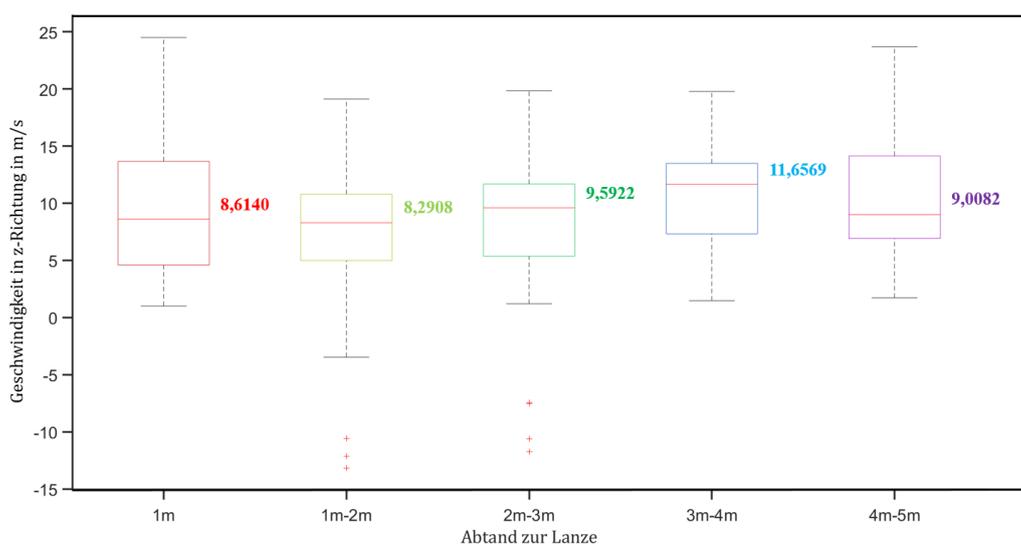
Abbildung 110. Space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Konfetti bei 4,5 bar (oben) und 5 bar (unten) Förderdruck.**Tabelle 19.** Prozentualer Anteil der verbleibenden Konfetti Partikel.

Abstand zur Lanze Förderdruck	1m	1m-2m	2m-3m	3m-4m	4m-5m	5m-6m
4,5bar	90%	33,33%	8,33%	0%	0%	0%
5bar	90,70%	40,21%	0%	0%	0%	0%

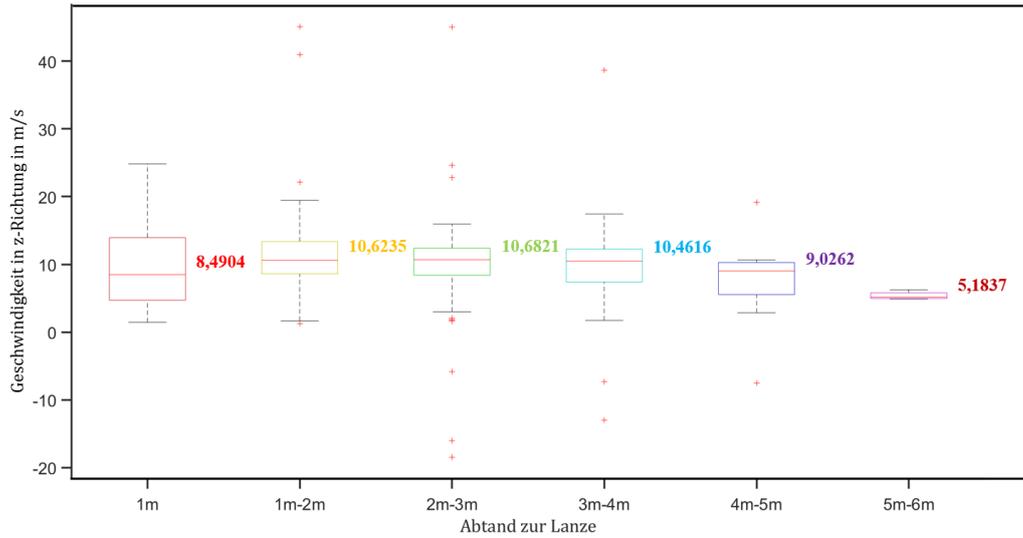
PE-Granulat

Abbildung 111 zeigt die space-sliced Tiefengeschwindigkeit von PE-Granulat bei 4,5 bar und 5 bar Förderdruck. Im Vergleich zu den ersten beiden Papierfraktionen ist PE-Granulat deutlich schneller und bewegt sich weiter in Tiefenrichtung. Mit Förderdruck von 4,5 bar beträgt der Median der Geschwindigkeit von PE-Granulat auf den ersten 2 m etwa 8 m/s und nimmt dann langsam zu. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sehr langsame Partikel nicht weiter als 2 m vordringen und damit in die Medianberechnung für größere Weiten nicht mit eingehen. Ab einem Abstand von 5 m ist es schwierig, die verbleibenden PE-Partikel zu finden. Wenn der Förderdruck auf 5 bar erhöht wird, nimmt die Anfangsgeschwindigkeit von PE-Granulat leicht ab. Ab einer Entfernung von 1 m steigt die Geschwindigkeit allmählich auf etwa 10 m/s an. Nach 4 m Abstand nimmt der Median der Geschwindigkeit leicht ab. Mit einer Entfernung von 5-6 m von Lanze können ebenfalls einige PE-Granulat Partikel nachgewiesen werden, deren Median-Geschwindigkeit jedoch deutlich abgenommen hat.

Die Tabelle 20 stellt den Prozentsatz des in den einzelnen Entfernungen verbleibenden PE-Granulats dar. Bei beiden Förderdrücken können sich alle PE-Granulat-Partikel mehr als 1 m in der Tiefenrichtung bewegen, und die überwiegende Mehrheit des PE-Granulats kann zwei Meter überschreiten. Bei einem Förderdruck von 4,5 bar können etwa 44% der PE-Granulat-Partikel eine Entfernung von 3 m erreichen, während dieser Prozentsatz bei einem Förderdruck von 5 bar 80% erreicht. Bei einem Abstand von mehr als 4 m ist der verbleibende Prozentsatz der PE-Granulat deutlich geringer.



(a)



(b)

Abbildung 111. Space-sliced Tiefengeschwindigkeit von PE-Granulat bei 4,5 bar (oben) und 5 bar (unten) Förderdruck.

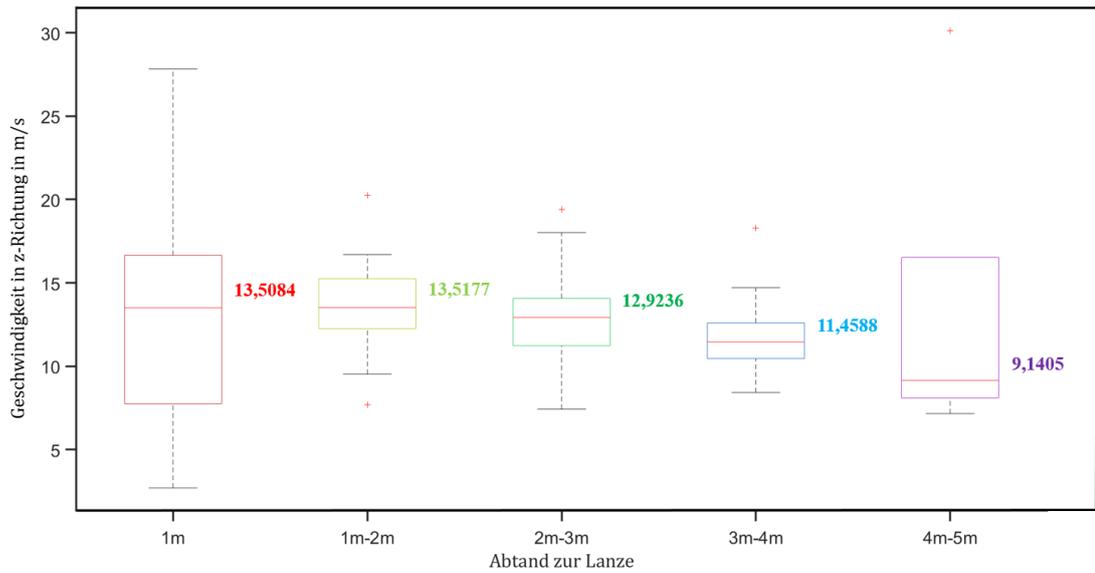
Tabelle 20. Prozentualer Anteil des verbleibenden PE-Granulats.

Abstand zur Lanze Förderdruck	1m	1m-2m	2m-3m	3m-4m	4m-5m	5m-6m
4,5bar	100%	95,90%	44,10%	18,46%	3,59%	0%
5bar	100%	97,24%	80,69%	28,28%	6,21%	3,45%

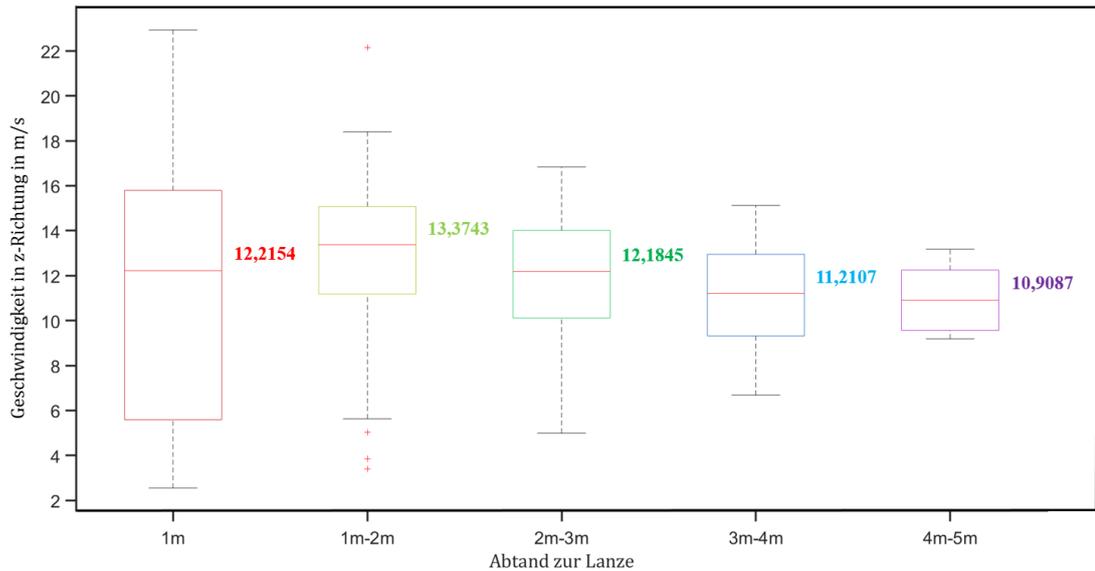
Holzackschnitzel

Abbildung 112 zeigt die space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Holzackschnitzeln bei 4,5 bar und 5 bar Förderdruck. Offensichtlich ist, dass Holzackschnitzel initial schneller als die anderen Fraktionen sind. Bei dem Experiment bei 4,5 bar Förderdruck kann der Median der Anfangsgeschwindigkeit der Holzackschnitzel 13,5 m/s erreichen und fällt dann langsam auf etwa 9 m/s ab. Wenn der Förderdruck auf 5 bar erhöht wird, verringert sich die Tiefengeschwindigkeit der Partikel beim Austritt aus der Lanze, die dann leicht ansteigt und danach wieder absinkt. Im Allgemeinen unterscheidet sich die Geschwindigkeit bei 5 bar Förderdruck nicht wesentlich von der 4,5 bar Förderdruck. Die Geschwindigkeit beim 5 bar Luftdruck ist nur leicht reduziert.

Die Tabelle 21 zeigt den Prozentsatz der in den einzelnen Entfernungen verbleibenden Holzackschnitzel. Bei beiden Förderdrücken können sich alle Partikel mehr als 1 m in die Tiefe bewegen und die meisten von ihnen können mehr als 3 m in der Tiefenrichtung erreichen. Etwa 30% der Holzackschnitzel können sich bis zu einer Entfernung von 4 m von der Lanze bewegen. Bei einer Entfernung von mehr als 5 m ist der Anteil der verbleibenden Partikel deutlich geringer.



(a)



(b)

Abbildung 112. Space-sliced Tiefengeschwindigkeit von Holzhackschnitzeln bei 4,5 bar (oben) und 6 bar (unten) Förderdruck.

Tabelle 21. Prozentualer Anteil der verbleibenden Holzhackschnitzel.

Abstand zur Lanze Förderdruck	1m	1m-2m	2m-3m	3m-4m	4m-5m	5m-6m
4,5bar	100%	100%	82,72%	32,10%	6,17%	0%
5bar	100%	94,34%	62,26%	29,24%	7,55%	0%

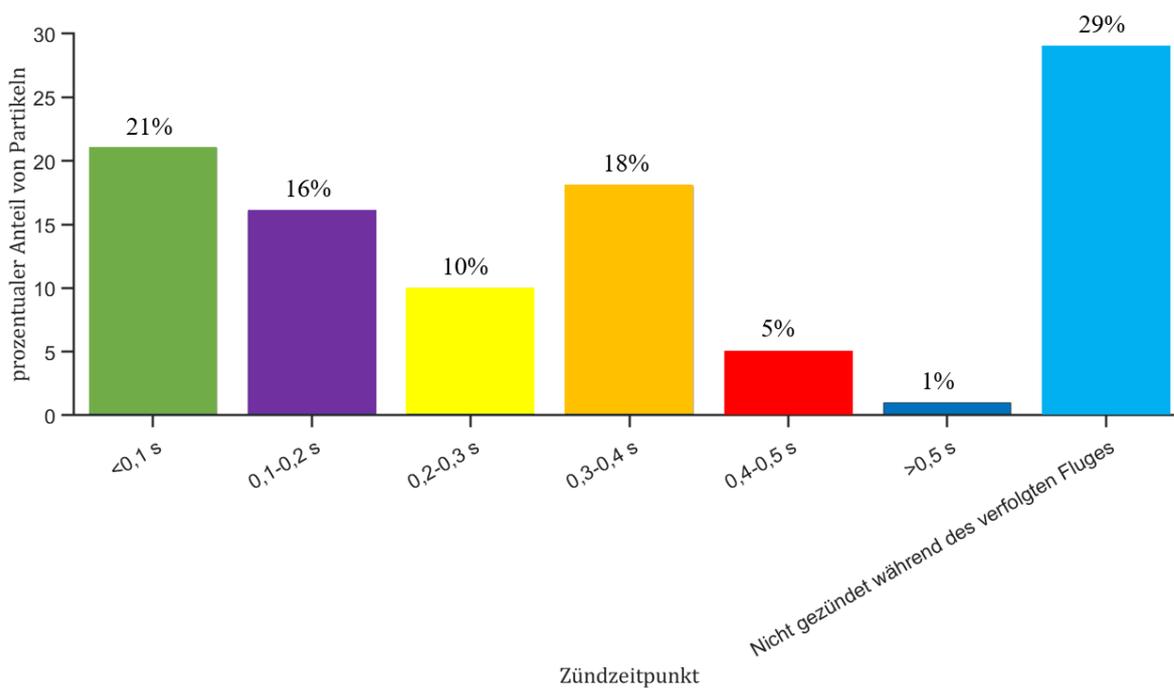
Abbrand Verhalten verschiedener Ersatzbrennstoffe

Papierschnipsel

Abbildung 113 zeigt die Zündzeitpunkte von Papierschnipseln bei 4,5 bar und 5 bar Förderdruck. Die Zündzeiten werden in 0,1 s-Intervallen in einem Tortendiagramm dargestellt. Bei 4,5 bar Luftdruck werden mehr als 70% der Papierschnipsel im Flug gezündet, 20 % davon innerhalb von 0,1s. Die überwiegende Mehrheit der Papierschnipsel brennt innerhalb von 0,4 s. Bei 5 bar Förderdruck entzünden sich nur ca. 42 % der Papierschnipsel und die Zündung erfolgt im Mittel später als bei 4,5 bar (unter Berücksichtigung der dabei vorliegenden Bedingungen im Drehrohr). Nur 6 % der Papierschnipsel werden innerhalb von 0,1 s entzündet. Der Anteil der Papierschnipsel, die sich in mehr als 0,5 s entzünden, ist ebenfalls höher als bei 4,5 bar Förderdruck.

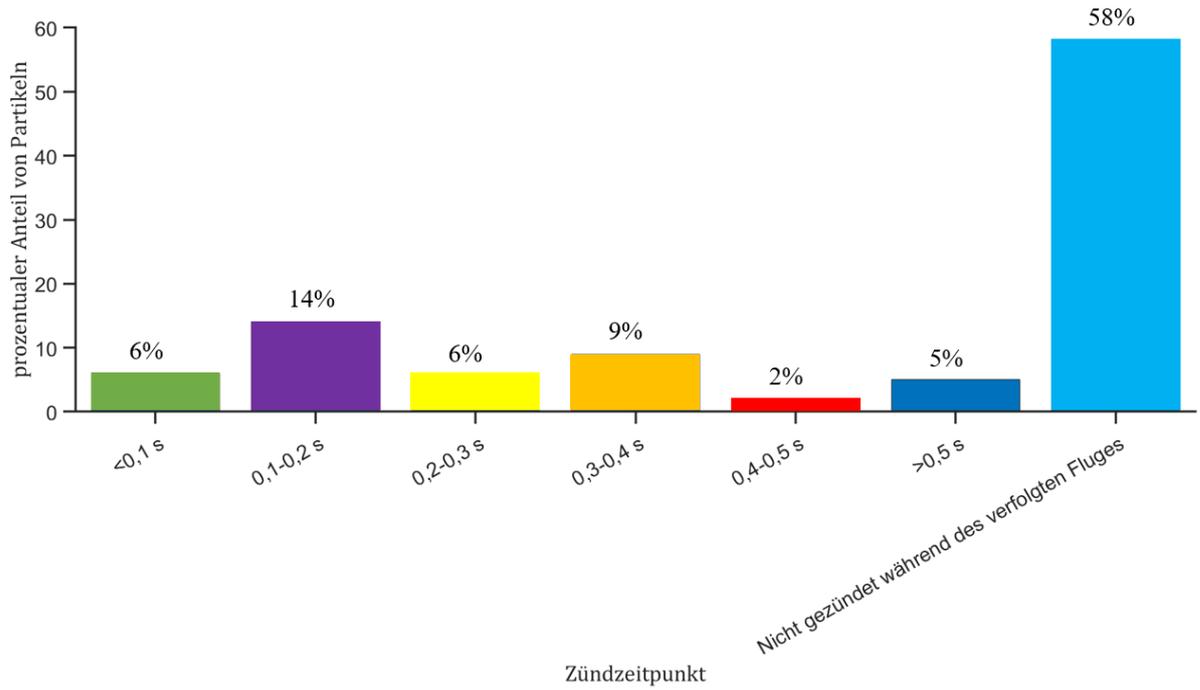
Konfetti

Abbildung 114 stellt die Zündzeitpunkte von Konfetti bei 4,5 bar und 5 bar Förderdruck dar. Im Vergleich zum Papierschnipsel hat das Konfetti einen späteren Zündzeitpunkt, bzw. die Konfetti-Partikel zünden nicht im Flug. Bei 4,5 bar Förderdruck entzünden sich nur etwa 26 % der Konfetti-Partikel, und nur 3 % des Konfettis zünden innerhalb von 0,1 s. Die meisten der brennenden Konfettis zünden zwischen 0,1 und 0,2 s. Wie bei den Papierschnipseln nimmt der Prozentsatz der Partikel, die gezündet werden, mit zunehmendem Förderdruck ab. Nur weniger als 20 % der Konfettis zünden, und kein Konfetti zündet innerhalb von 0,1 Sekunden nach Verlassen der Lanze. Die meisten brennenden Konfettipartikel werden zwischen 0,2 und 0,3 s gezündet.



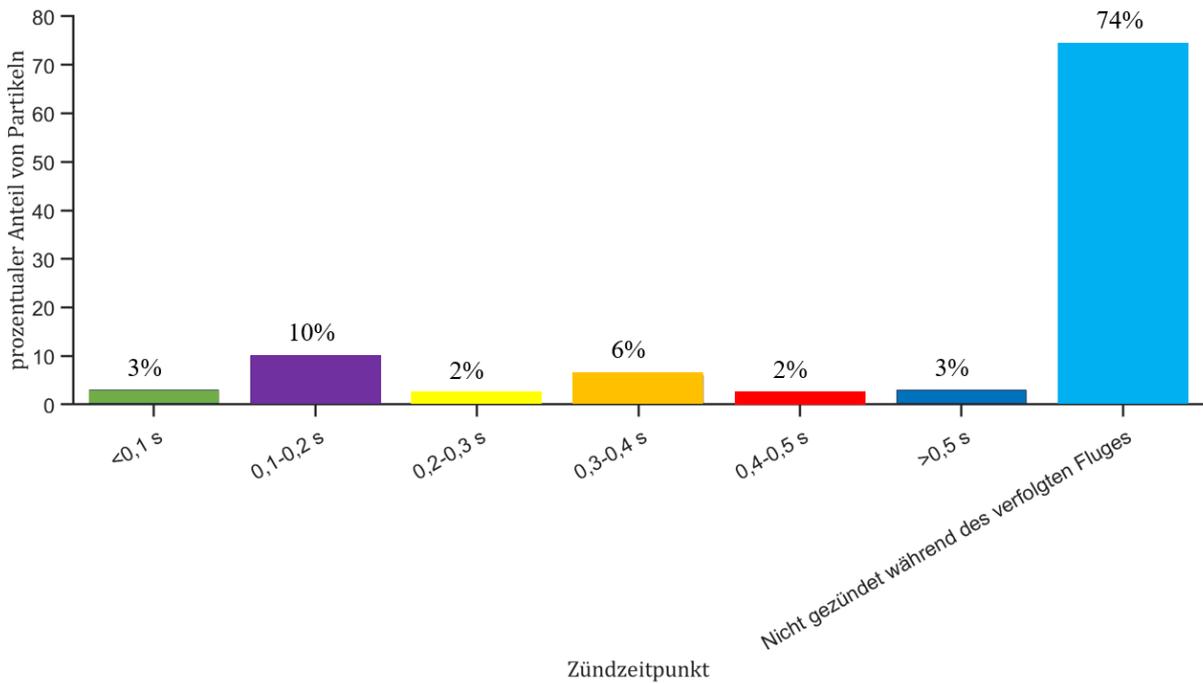
Zündzeitpunkt

(a)



(b)

Abbildung 113. Zündzeitpunkt von Papierschnipsel bei 4,5 bar (a) und 5 bar (b) Förderdruck.



(a)

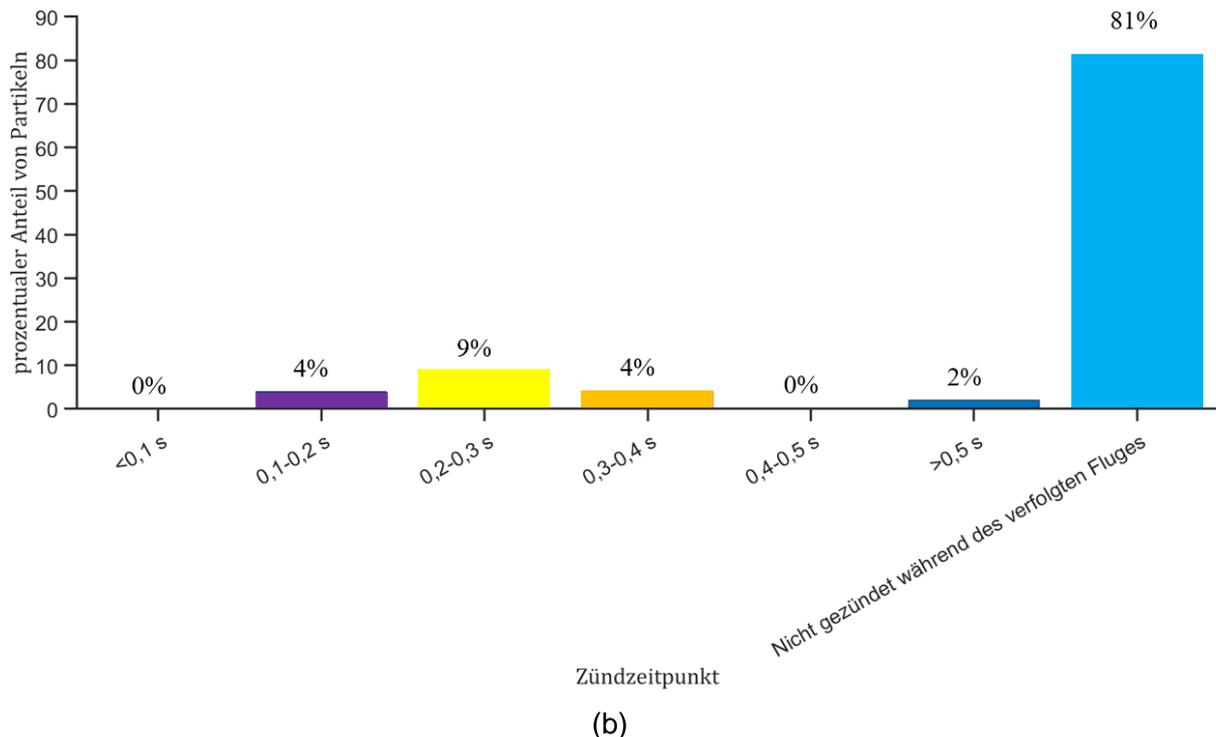


Abbildung 114. Zündzeitpunkt von Konfetti bei 4,5 bar (a) und 5 bar (b) Förderdruck.

PE-Granulat

Nach den in Arbeitspaket 9 vorgestellten Ergebnissen zündeten PE-Granulat-Partikel nicht im Flug. Eine Aussage zu Zündzeitpunkten im Flug ist daher nicht möglich.

Holzhackschnitzel

Nach den in Arbeitspaket 9 vorgestellten Ergebnissen zündeten Holzhackschnitzel nicht im Flug. Eine Aussage zu Zündzeitpunkten im Flug ist daher nicht möglich.

EBS-Datenbank, Modellansätze sowie Benchmark

Die am LEAT aus Vorprojekten vorhandene EBS-Datenbank wurde durch die vorliegenden Projektergebnisse ergänzt. Dabei wurden die durchgeführten Brennstoff-, RFA sowie Flug- und Abbrandanalysen der Datenbank hinzugefügt. Die erweiterte Datenbank steht zur Opensource-Nutzung zur Verfügung. Der Nutzungszugang wird auf der Homepage des LEAT unter <http://www.lead.ruhr-uni-bochum.de/index.php?do=Forschung/Projekte/IGF20410N.htm> beschrieben. Ebenso sind hier die beschriebenen Simulationsmodellansätze, der Zugriff auf die User Defined Functions zur Nutzung in Kombination mit der Software Fluent sowie die Messergebnisse aus den Lichtfeldkamerakampagnen (Benchmark für zukünftige CFD-Simulationen) zu finden.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieses Projektes sollten bereits bestehende Simulationsmodelle zum Flug- und Abbrandverhalten von FLUFF-Partikeln erweitert und durch die Kombination mit Versuchen im größeren Maßstab in einer halbtechnischen Drehrohrofenanlage überprüft werden.

Zunächst wurden Laboruntersuchungen durchgeführt (Immediat- und Elementaranalyse sowie Kalorimetrie), um den einzusetzenden heterogenen Brennstoff zu charakterisieren. Diese wurden durch die Bestimmung an einem weiterentwickelten Fallschachtsystem sowie an zwei Einzelpartikelreaktoren ergänzt. Das Fallschachtsystem ermöglichte es, durch photogrammetrische Untersuchungen die Partikelgeometrie genau zu charakterisieren. Durch einen neu entwickelten Algorithmus wurden die gewonnenen 3D-Modelle mit den durch die Fallschachtversuche bestimmten Sinkgeschwindigkeiten gekoppelt, um darüber Häufigkeitsverteilungen der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte der im Brennstoff enthaltenen Partikel zu bestimmen. Ferner wurden durch die Einzelpartikelreaktoruntersuchungen das Abbrand- sowie Erweichungs- und Schmelzverhalten der FLUFF-Partikel untersucht. Die experimentell gewonnenen Daten wurden in die Simulationsmodelle eingepflegt.

Parallel dazu wurden an einer halbtechnischen Drehrohrofenanlage (BRENDA) Versuche durchgeführt und mittels Lichtfeldkamera Partikeltrajektorien aufgenommen. Durch ein neuentwickeltes Auswertesystem wurde eine Partikeldetektion und ein Partikeltracking durchgeführt und Verweilzeiten und Geschwindigkeiten der Partikel bestimmt.

Die in den BRENDA-Kampagnen durchgeführten Versuche wurden nachsimuliert. Dabei wurden in den Simulationen die gleichen Randbedingungen eingestellt wie in der Anlage. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Flugzeiten und Geschwindigkeiten der Partikel.

Zukünftig werden weitere Fallschachtversuche erfolgen, sodass ebenso eine gute Grundstatistik für reale FLUFF-Partikel gegeben ist. Speziell die vom KIT bereitgestellten Daten ermöglichen es, auch noch in Zukunft Simulationsmodelle an experimentell ermittelten Daten zu überprüfen.

4. Verwendung der Zuwendung

FS1: LEAT – RUB

AP1: Brennstoffbeschaffung und Grundcharakterisierung

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier war für Durchführung, Koordination und Auswertung von Laboruntersuchungen zuständig (2 PM).

AP2: Ermittlung der Widerstands- und Auftriebsbeiwerte an nicht-reagierenden Partikeln in einem Fallschacht

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier (sowie anfänglich Frederic Buß) war für die Konstruktion und Planung des Fallschachtsystems sowie für die Programmierung der Auswerteroutinen zuständig. Zusätzlich war er für die Koordination und Durchführung der Experimente verantwortlich (6 PM).
- Ausgaben für Gerätebeschaffung
Zur Ergänzung der Partikelcharakterisierung wurde ein Röntgenfluoreszenzanalysator beschafft, um damit „stoffliche Fingerprints“ der Partikel aufzunehmen.

AP3: Abbrandversuche an einem Einzelpartikelreaktor

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier war für die Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihen verantwortlich (4 PM).

AP4: Erweiterung und Überprüfung der Flug- und Abbrandmodelle

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier war für die Aktualisierung und Durchführung der numerischen Simulationen zuständig (3 PM).

AP7: Versuche in einem „heißen“ Fallschacht an reagierenden Partikeln im Flugstrom

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Aus zeitlichen Gründen wurde die geplante Zeit zur Messung der Gasgrundströmung mittels Traversierungsmessungen in die Programmierung der Auswerteroutinen des Fallschachtsystems investiert (2 PM).

AP8: Simulation der heißen Fallschachtversuche und Modellabgleich

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Aus projektspezifischen Gründen wurde die geplante Zeit zur Simulation der heißen Fallschachtversuche in die Einzelpartikelreaktorversuche investiert (3 PM).

AP10: Simulation der Drehrohrversuche und Modellabgleich, Anwendung auf ein industrielles Zementdrehrohr

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier (sowie anfänglich Frederic Buß) war für die Erstellung der Simulationsdomäne inklusive der numerischen Simulation der BRENDA-Versuchskampagnen sowie der Simulation eines industriellen Zementdrehrohrs zuständig (7 PM).

AP11: Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie der EBS-Datenbank, Veröffentlichung

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Robin Streier war mit für die Anfertigung des Abschlussberichtes sowie die Dokumentation und Open Source zur Verfügungsstellung der Projektergebnisse (EBS-Datenbank, EBS-Modellbeschreibung, User Defined Subroutines) zuständig (3 PM).

FS2: ITC – KIT

AP1: Brennstoffbeschaffung und Grundcharakterisierung

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Krasimir Aleksandrov war für die Beschaffung und Zerkleinerung des FLUFFs sowie für die Beschaffung der Modellpartikel zuständig (2 PM).

AP5: Modifikation und Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage BRENDA

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Krasimir Aleksandrov war für die Konstruktion der Lanzen und Modifikation der Versuchsanlage verantwortlich. Ferner hat er die Inbetriebnahme der Anlage koordiniert (4,5 PM).

AP7: Versuche in einem „heißen“ Fallschacht an reagierenden Partikeln im Flugstrom

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Krasimir Aleksandrov war für Durchführung der „heißen Fallschacht“ Versuche verantwortlich (7 PM).

AP9: Verbrennungsversuche in einem halbtechnischen Drehrohr

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Krasimir Aleksandrov war für Durchführung der Drehrohrversuche zuständig (7 PM).

AP11: Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie EBS-Datenbank, Veröffentlichung

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Der wissenschaftliche Mitarbeiter Krasimir Aleksandrov war mit für die Anfertigung des Abschlussberichtes und dem Wissenstransfer in die Wirtschaft zuständig (2 PM).

FS3: IAI - KIT

AP6: Entwicklung eines optischen Messsystems zur Analyse des Flug- und Zündverhaltens reagierender Partikel

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Die wissenschaftliche Mitarbeiterin Frau Miao Zhang war für die Entwicklung des Messsystems inkl. der Auswerteverfahren zuständig. (12,5 PM)
- Ausgaben für Gerätebeschaffung
Für die bereits vorhandene Lichtfeldkamera wurde ein Aufnahme- und Auswerterechnersystem (Light-Field-Engine der Firma Raytrix) beschafft

AP7: Versuche in einem „heißen“ Fallschacht an reagierenden Partikeln im Flugstrom

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Die wissenschaftliche Mitarbeiterin Frau Miao Zhang führte die kamerabasierte Messung und Auswertung der Versuche am „heißen“ Fallschacht durch. (4 PM)

AP9: Verbrennungsversuche in einem halbtechnischen Drehrohr

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Die wissenschaftliche Mitarbeiterin Frau Miao Zhang führte die kamerabasierte Messung und Auswertung der Versuche am Drehrohr durch. (6 PM)

AP11: Aufbereitung der Flug- und Abbrandmodelle sowie der EBS-Datenbank, Veröffentlichung

- Wissenschaftlich-technisches Personal
Die wissenschaftliche Mitarbeiterin Frau Miao Zhang war mit der Aufbereitung der Kameramessdaten hinsichtlich der Flug- und Abbrandmodelle beschäftigt. Zudem erstellte sie federführend mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen. (2 PM)

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag definierten Aufgabenstellungen und ist für den Umfang der Ergebnisse und neuen Erkenntnisse bezüglich der thermischen Umsetzung von FLUFF angemessen.

6. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Von den Ergebnissen dieses Projektes profitieren in erster Linie die KMU der Zementindustrie. So wurden durch erweiterte Brennstoffcharakterisierungen zahlreiche Informationen bezüglich des Brennstoffes FLUFF gesammelt und in einer EBS-Datenbank öffentlich zur Verfügung gestellt, die den Zementwerksbetreibern dabei helfen, die Eigenschaften des zu verfeuernden FLUFF abzuschätzen und in ihrer Prozessführung zu berücksichtigen. Die durchgeführten Versuche an der halbtechnischen Anlage BRENDA und die angestellte Auswertung der Lichtfeldkameraaufnahmen dienten erstmalig dazu, die Simulationsmodelle in einem größeren versuchstechnischen Rahmen zu überprüfen. Die EBS-Flug- und Abbrandmodelle sind für die meist mittelständischen CFD-Dienstleister dokumentiert und frei verfügbar. Der vom KIT bereitgestellte Datensatz mit Informationen bezüglich des Flug- und Abbrandverhalten von FLUFF steht ebenfalls als Open-Source-Paket zur Verfügung und wird auch noch zukünftig wichtig sein, um Simulationen zu überprüfen und an die Realität anzugleichen. Dies wirkt sich insbesondere günstig auf die Zementwerksbetreiber aus, die ihre Anlagen mit experimentell abgesicherten CFD-Modellen simulieren lassen können und damit ein prädiktives Werkzeug haben, um den EBS-Einsatz in Drehrohrofenfeuerung zu bewerten.

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Zeitraum	Erfüllungsstatus
Information der Unternehmen im PA	Fortlaufend	Vier der vier geplanten PA-Treffen haben stattgefunden (01.07.19, 15.09.20, 05.02.21, 26.01.22)
Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Fortlaufend	Firmen wie Doppstadt Systemtechnik GmbH wurden kontaktiert
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Halbjährlich	Aktuelle Zusammenfassungen auf Homepage der Institute und der Homepage der DVV
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertationen, in Fachzeitschriften oder sonstigen Veröffentlichungen	Während des gesamten Bewilligungszeitraums	In <i>Forum Bildverarbeitung</i> (2020) In <i>Technisches Messen</i> (2021) In <i>Advanced in Automation, Mechanical and Design Engineering</i> (2021)
Übernahme von Ergebnissen in die akademischen Lehre	Fortlaufend	Ergebnisdarstellung in der Vorlesung <i>Energietechnik und Ressourcenmanagement</i>
Arbeitskreise der Forschungsgemeinschaft	Fortlaufend	Projektpräsentation auf der DVV Jahressitzung (14.11.2019)
In anderen Fach- und Branchenverbänden und auf Fachtagungen	Fortlaufend	Flammentag (28.09.21)
Einbeziehung von Multiplikatoren	1x jährlich	Austausch mit dem VDZ. Wissenstransfer durch Werksversuche bei Phoenix Zementwerke Krogbeumker GmbH & Co. KG (10.06.21)
Personaltransfer	Fortlaufend	Betreuung von Projekt, Bachelor- und Masterarbeiten (2019, 2020, 2021)

Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Zeitraum	Erfüllungsstatus
Vorträge	Nach Ende der Projektlaufzeit	13th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers
Entwicklung weiterführender Projekte/ Untersuchungen auf Grundlage der Ergebnisse	Nach Ende der Projektlaufzeit	Die Photogrammetrie und RFA wird bereits in anderen Projekten genutzt. Weiterführende Projekte sind geplant.
Verwendung der Ergebnisse in der akademischen Lehre	Nach Ende der Projektlaufzeit	Einbeziehung der Ergebnisse in die Lehrveranstaltung <i>Energietechnik und Ressourcenmanagement</i>
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertationen, in Fachzeitschriften oder sonstigen Veröffentlichungen	Nach Ende der Projektlaufzeit	In <i>IEEE Journal of Transactions on Image Processing</i> (2022) In <i>Fuel</i> (2022)
Weiterentwicklung und Nutzung des entwickelten optischen Messsystems und der CFD-Codes für Analysen in industriellen Anlagen. Das an die Validierung mit Kameradaten erprobte mathematische Modell kann insbesondere für neue Zementprozesse unter Oxyfuelbedingungen einen wertvollen Beitrag leisten	Nach Ende der Projektlaufzeit	Übergabe der FLUENT-EBS-Modelle an thyssenkrupp Industrial Solutions
Beratung und Weiterbildung in Unternehmen	Nach Ende der Projektlaufzeit	Präsentation der Ergebnisse bei der Firma Martin GmbH (22.02.22) Erfolgt fortlaufend (bspw. thyssenkrupp Industrial Solutions)

Insbesondere die KMU werden durch die oben dargestellten Transfermaßnahmen informiert und können die Forschungsergebnisse dadurch entsprechend umsetzen.

Eine Liste der Veröffentlichungen ist nachfolgend dargestellt:

[A] M. Zhang, M. Vogelbacher, K. Aleksandrov, H.-J. Gehrmann, D. Stapf, R. Streier, S. Wirtz, V. Scherer, J. Matthes, „Analysis of spatial flight properties of refuse-derived fuel particles based on a light-field camera system“, in: Proc. 13th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Algarve, Portugal, 2022.

[B] M. Zhang, J. Matthes, K. Aleksandrov, H.-J. Gehrman, M. Vogelbacher, „Light-field camera based spatial multiple small particle tracking with post-processing“, in: M. A. Laribi, G. Carbone, Z. Jiang (Eds.), *Advances in Automation, Mechanical and Design Engineering*, Springer International Publishing, Cham, 2022.

[C] M. Zhang, J. Matthes, K. Aleksandrov, H. J. Gehrman, M. Vogelbacher, „Detection and tracking of refuse-derived fuel particles based on a light field camera system“, *Technisches Messen* 88 (6) (2021) 396–407, 2021.

[D] M. Zhang, M. Vogelbacher, K. Aleksandrov, H.-J. Gehrman, J. Matthes, „Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens von Ersatzbrennstoffen auf Basis eines Lichtfeldkmerasystems“, in *Proc. Forum Bildverarbeitung* 2020.

[E] M. Vogelbacher, M. Zhang, K. Aleksandrov, H. -J. Gehrman and J. Matthes, „2D and 3D Benchmark for Particle Detection from an Industrial Rotary Kiln Combustion Chamber Based on Light-Field-Camera Recording“, *Machine Vision and Applications*, Springer, 2022. (eingereicht)

[F] Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Veit Hagenmeyer, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gehrman, and Jörg Matthes, “3D Refuse-derived Fuel Particle Tracking-by-Detection Using a Plenoptic Camera System”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022. (in revision)

[G] Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gehrman, Dieter Stapf, Robin Streier, Siegmart Wirtz, Viktor Scherer, Jörg Matthes “Investigation into Flight and Combustion Behaviors of Refuse-derived Fuel Particles based on a Plenoptic Camera System”, *Fuel*, Elsevier, 2022. (ausgewählt auf INFUB 2022 für Publikation in *Fuel*, eingereicht)

[H] Robin Streier, Siegmart Wirtz, Viktor Scherer, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gehrman, Dieter Stapf, Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Jörg Matthes “Experimentelle Absicherung von CFD-Modellen für die thermische Umsetzung von Ersatzbrennstoffen (FLUFF)”, 30. *Deutscher Flammentag*, 2022.

[I] Robin Streier, Siegmart Wirtz, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gerhman, Dieter Stapf, Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Jörg Matthes, Viktor Scherer “Determination of the aerodynamic properties of refuse derived fuel by computer vision” 13th *European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, Algarve, Portugal, 2022.

[J] Robin Streier, Siegmart Wirtz, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gerhman, Dieter Stapf, Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Jörg Matthes, Viktor Scherer “Determination of the aerodynamic properties of refuse derived fuel by computer vision” *Fuel*, Elsevier, 2022. (ausgewählt auf INFUB 2022 für Publikation in *Fuel*).

8. Umsetzung des Transferkonzeptes

Interessierten Unternehmen werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts über den Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträgen bei Fachtagungen und Konferenzen sowie über den Schlussbericht international und national bereitgestellt. Das veröffentlichte Material beinhaltet sowohl die erlangten Erkenntnisse als auch die für die Simulation von industriellen Anlagen benötigten Daten der erweiterten Brennstoffcharakterisierung und sowie Ergebnisse aus den BRENDA-Kampagnen zur Überprüfung der Simulationsmodelle. Hierdurch sind Anlagenbetreiber in der Lage Rückschlüsse auf das Flug- und Abbrandverhalten ihres einzusetzenden Ersatzbrennstoffes zu ziehen.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse durch die Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss und die akademische Lehre in die Praxis getragen.

Die Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden im Wesentlichen wie geplant durchgeführt. Ebenso werden die nach Abschluss des Forschungsvorhabens geplanten Maßnahmen als realisierbar bewertet.

9. Gewerbliche Schutzrechte

Für die aus diesem forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse wurden keine gewerblichen Schutzrechte beantragt.

10. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20410 N der Forschungsvereinigung DVV wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] B. Liedmann, "Simulation der thermischen Umsetzung flugfähiger Ersatzbrennstoffe in Drehrohröfen der Zementindustrie," Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- [2] M. M. H. Khan, J. Havukainen, and M. Horttanainen, "Impact of utilizing solid recovered fuel on the global warming potential of cement production and waste management system: A life cycle assessment approach," *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, vol. 39, no. 4, pp. 561–572, 2021, doi: 10.1177/0734242X20978277.
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), "Zementindustrie im Überblick," Köln, 2021/2022. Accessed: Sep. 20 2022. [Online]. Available: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf
- [4] V. Scherer, *Grundlagen der technischen Verbrennung, Vorlesungsskript*, 2019.
- [5] T. Korte, "Evaluierung von möglichen Verfahren zur diskreten Abbildung grobstückiger Brennstoffe in DEM-Simulationen," Bacherloarbeit, Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2019.
- [6] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *International Conference on Computer Vision-Volume 2, Corfu, Greece, 20.09-25.09.1999*, Kerkyra, Greece, 20--, 1150-1157 vol.2.
- [7] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000, doi: 10.1109/34.888718.
- [8] R. Streier, S. Wirtz, V. Scherer, and et al., "Determination of the drag and lift coefficients of refuse derived fuel by computer vision," in *Proc. 13th INFUB*.
- [9] M.-K. Hu, "Visual pattern recognition by moment invariants," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 8, no. 2, pp. 179–187, 1962, doi: 10.1109/TIT.1962.1057692.
- [10] S. Bschorer, *Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [11] *Plastics Flammability Handbook - Principles, Regulations, Testing, and Approval (3rd Edition): Principles, regulations, testing, and approval*, 3rd ed.: Hanser Publishers, 2004. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9781569907627>
- [12] M. Schütt, "Thermoplastische Zwischenlagen zur Verbesserung der Brandbeständigkeit von carbonfaserverstärkten Epoxidharzsystemen," Dissertation, Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik, Technische Universität Cottbus, Cottbus, 2015.
- [13] Bargel and G. Schulze, *Werkstoffkunde*, 9th ed. Berlin: Springer, 2005. [Online]. Available: <https://swbplus.bsz-bw.de/bsz118800728err.htm>
- [14] H. Briehl, *CHEMIE DER WERKSTOFFE*, 4th ed. [S.l.]: Springer, 2021. [Online]. Available: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1903033>
- [15] A. Hölzer and M. Sommerfeld, "New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles," *Powder Technology*, vol. 184, no. 3, pp. 361–365, 2008, doi: 10.1016/j.powtec.2007.08.021.
- [16] M. M. BAUM and P. J. STREET, "Predicting the Combustion Behaviour of Coal Particles," *Combustion Science and Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 231–243, 1971, doi: 10.1080/00102207108952290.

- [17] M. A. Field, "Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1 200°K and 2 000°K," *Combustion and Flame*, vol. 13, no. 3, pp. 237–252, 1969, doi: 10.1016/0010-2180(69)90002-9.
- [18] T. Bluhm-Drenhaus, A. Becker, S. Wirtz, and V. Scherer, "A model for the devolatilisation of large thermoplastic particles under co-firing conditions," *Fuel*, vol. 101, pp. 161–170, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2012.05.041.
- [19] H. Bockhorn, A. Hornung, U. Hornung, and D. Schawaller, "Kinetic study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 48, no. 2, pp. 93–109, 1999, doi: 10.1016/S0165-2370(98)00131-4.
- [20] H. Sardemann, "Untersuchungen zur Genauigkeit von Streckenmessungen mit einer fokussierten plenoptischen Kamera im Fernbereich," in *DGPF Tagungsband 23 / 2014*.
- [21] C. Perwass and L. Wietzke, "Single lens 3D-camera with extended depth-of-field," in *Human Vision and Electronic Imaging XVII*, Burlingame, California, USA, 2012, p. 829108.
- [22] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [23] E. Schubert, J. Sander, M. Ester, H. P. Kriegel, and X. Xu, "DBSCAN Revisited, Revisited," *ACM Trans. Database Syst.*, vol. 42, no. 3, pp. 1–21, 2017, doi: 10.1145/3068335.
- [24] Miao Zhang, Markus Vogelbacher, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gehrmann, and Jörg Matthes, "Analyse des Flug- und Abbrandverhaltens von Ersatzbrennstoffen auf Basis eines Lichtfeldkamarasystems," in *in Proc. Forum Bildverarbeitung 2020*.
- [25] M. Zhang, J. Matthes, K. Aleksandrov, H.-J. Gehrmann, and M. Vogelbacher, "Detektion und Tracking von Brennstoffpartikeln auf Basis eines Lichtfeldkamarasystems," *tm - Technisches Messen*, vol. 88, no. 6, pp. 396–407, 2021, doi: 10.1515/teme-2021-0016.
- [26] P. Konstantinova, A. Udvarev, and T. Semerdjiev, "A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach," in *Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Technologies (e-Learning), CompSysTech'2003, Sofia, Bulgaria, 19-20 June*, Rousse, Bulgaria, 2003, pp. 290–295.
- [27] J. Munkres, "Algorithms for the Assignment and Transportation Problems," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 32–38, 1957, doi: 10.1137/0105003.
- [28] T. Fortmann, Y. Bar-Shalom, and M. Scheffe, "Multi-target tracking using joint probabilistic data association," in *1980 19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, Albuquerque, NM, USA, Dec. 1980 - Dec. 1980, pp. 807–812.
- [29] M. Zhang, J. Matthes, K. Aleksandrov, H.-J. Gehrmann, and M. Vogelbacher, "Light-Field Camera Based Spatial Multiple Small Particle Tracking with Post-processing," in *Mechanisms and Machine Science, Advances in Automation, Mechanical and Design Engineering: Samde 2021*, M. A. Laribi, Ed., Cham: Springer, pp. 95–123.
- [30] E. Ostertagová, "Modelling using Polynomial Regression," *Procedia Engineering*, vol. 48, pp. 500–506, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.545.
- [31] T. F. Coleman and Y. Li, "An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds," *SIAM J. Optim.*, vol. 6, no. 2, pp. 418–445, 1996, doi: 10.1137/0806023.
- [32] Miao Zhang, M. Vogelbacher, Veit Hagenmeyer, Krasimir Aleksandrov, Hans-Joachim Gehrmann, and Jörg Matthes, "2D and 3D Benchmark for Particle Detection from an Industrial Rotary Kiln Combustion Chamber Based on Light-Field-Camera Recording," in *IEEE JOURNAL OF TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, 2022.

- [33] N. Chenouard *et al.*, "Objective comparison of particle tracking methods," *Nature methods*, vol. 11, no. 3, pp. 281–289, 2014, doi: 10.1038/nmeth.2808.
- [34] S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss, M. Schiemann, S. Schaefer, and V. Scherer, "Impact of coating layers in rotary cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 15, p. 100429, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2019.100429.